

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

Marjukka Eloholma

MONIMETALLILAMPPUJEN JA VÄRIKORJATTUJEN SUURPAINE-
NATRIUMLAMPPUJEN OMINAISUUDET JA KÄYTTÖ

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 31.1.1990



Työn valvoja

Liisa Halonen

17724

TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

Alkulause

Työ on tehty Teknillisen Korkeakoulun Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratoriossa. Työn valvojana on toiminut apulaisprofessori Liisa Halonen, jota kiitän kaikista saamistani neuvoista ja ohjeista sekä kannustavasta suhtautumisesta työhöni.

Laboratoriossa samaan aikaan työskennelleitä kiitän mukavasta työskentelyilmapiiristä.

Ensto Oy:tä ja erityisesti valaisinyksikön johtaja Tom Korkolaista kiitän yhteistyöstä diplomityön teon aikana.

Mattia, joka on ollut vierelläni, kiitän loputtomasta kärsivällisyydestä ja vaikeinakin hetkinä saamastani tuesta.

Espoossa 31.1.1990

Marjukka Eloholma *Eloholma*
Marjukka Eloholma
Harjantekijäntie 3 C 8
00640 Helsinki

TEKNILLINEN KORKEAKOULU DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä ja työn nimi: Marjukka Eloholma

Monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen ominaisuudet ja käyttö

Päivämäärä: 31.1.1990

Sivumäärä: 184

Osasto:
Sähkötekniikan osasto

Professuuri:
Svt-18 Sähkölaitokset

Työn valvoja:
Apulaisprofessori Liisa Halonen

Työn ohjaaja:

Työn tarkoituksena oli selvittää monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen ominaisuuksia ja niiden soveltuvuutta erilaisiin käyttökohteisiin.

Työssä on selvitetty monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen rakenne ja tehty yhteenveto eri lampputyypeistä.

Kirjallisuuteen ja lamppuvalmistajien kanssa käytyihin keskusteluihin perustuen on selvitetty ulkoisten tekijöiden vaikutusta lamppujen toimintaan. Tehtyjen mittausten avulla on tutkittu syöttöjännitteen säädön vaikutusta lamppujen toimintaan ja erityisesti väriominaisuuksiin.

Työssä on selvitetty monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen soveltuvuutta erilaisiin käyttökohteisiin sekä tarkasteltu lamppujen valaistuskustannuksia.

Työn yhteydessä on koottu monimetalli- ja suurpainenatriumlampputmittauksista julkaistuja kansainvälisiä suosituksia ja ohjeita.

Hakusanat: Monimetallilamput, värikorjatut suurpainenatriumlamput, purkauslamput, valaistus.

Sisällysluettelo

Alkulause	i
Tiivistelmä	ii
Sisällysluettelo	iii
Liiteluettelo	ix
Käytetyt merkinnät	x
1. Johdanto	1
2. Lamppujen kehityksen historiaa	2
2.1 Monimetallilampun kehitys	2
2.2 Suurpainenatriumlampun kehitys	4
3. Lamppujen rakenne	7
3.1 Monimetallilamput	7
3.1.1 Yleistä	7
3.1.2 Purkausputki	8
3.1.3 Purkausputken täytös	10
3.1.4 Purkausputken virtaläpiviennit ja elektrodit	11
3.1.5 Getteri	11
3.1.6 Ulkokupu	12
3.1.7 Lampputyypit	12
3.1.7.1 Kierrekantalamput	12
3.1.7.2 Erikoiskantalamput	13
3.1.7.3 32 W monimetallilamppu DC-käyttöön	15
3.1.7.4 Kompaktilamput erikoiskäyttöön	15
3.1.7.5 UV-säteilijät tekniseen käyttöön	16
3.1.7.6 Tulevaisuuden lampputyypit	17
3.1.8 Liitäntälaitteet	18
3.1.8.1 Kuristin	18
3.1.8.2 Elektroninen liitäntälaite	20
3.1.8.3 Sytytyslaitteet	22
3.1.8.4 Ilman ulkoista sytytintä toimivat lamput	25

3.2	Suurpainenatriumlamput	26
3.2.1	Yleistä	26
3.2.2	Purkausputki	27
3.2.3	Purkausputken täytös	30
3.2.4	Purkausputken virtaläpiviennit ja elektrodit	31
3.2.5	Getteri	32
3.2.6	Ulkokupu	32
3.2.7	Lampputyypit	33
3.2.7.1	Kierrekantalamput	33
3.2.7.2	Erikoiskantalamput	33
3.2.8	Liitäntälaitteet	34
3.2.8.1	Kuristin	34
3.2.8.1.1	Suurpainenatriumlampun nelikulmiodiagrammi	36
3.2.8.2	Sytytyslaitteet	38
3.2.8.3	Ilman ulkoista sytytintä toimivat lamput	40
3.3	Yhteenveto	43
4.	Valontuotto	45
4.1	Lamppujen purkausputken kaasupurkaus	45
4.1.1	Kaasun lämpeneminen	45
4.1.2	Kaasun atomien virittyminen	46
4.1.3	Kaasun atomien ionisoituminen	47
4.1.4	Alkuaineiden energiatasokaavio	48
4.2	Kaasupurkauksen syttyminen	49
4.3	Korkeapaineisen kaasupurkauksen ominaisuuksia	51
4.4	Monimetallilampun valontuotto	51
4.4.1	Monimetallilampun purkausputken kaasupurkaus	51
4.4.2	Käytetyt metalliyhdisteet	52
4.4.3	Spektrin muodostuminen	53
4.4.3.1	Epäjatkuvan spektrin omaavat lamput	53
4.4.3.2	Suhteellisen jatkuvan spektrin omaavat lamput	54
4.4.4	Tehojakauma	57
4.4.5	Valovirran muutokset polttoajan aikana	59
4.5	Suurpainenatriumlampun valontuotto	60
4.5.1	Natriumpurkaus	60
4.5.2	Värikorjatun suurpainenatriumlampun purkausputken kaasupurkaus	63
4.5.3	Värikorjatun suurpainenatriumlampun spektri	64

4.5.4	Tehojakauma	64
4.5.5	Lamppujännitteen kasvu polttoiän aikana	66
4.5.6	Valovirran muutokset polttoiän aikana	69
4.6	Yhteenvedo	70
5.	Ulkoisten tekijöiden vaikutus lamppujen toimintaan	73
5.1	Verkojännitevaihtelut ja jännitekatkokset	73
5.1.1	Yleistä	73
5.1.2	Monimetallilamput	73
5.1.3	Suurpainenatriumlamput	76
5.2	Ympäristön lämpötila	78
5.2.1	Monimetallilamput	78
5.2.2	Suurpainenatriumlamput	78
5.3	Polttoasento	79
5.3.1	Monimetallilamput	79
5.3.2	Suurpainenatriumlamput	80
5.4	Valaisimen rakenne	80
5.4.1	Monimetallilamput	80
5.4.2	Suurpainenatriumlamput	82
5.5	Valovirran säätäminen	82
5.5.1	Monimetallilamput	82
5.5.2	Suurpainenatriumlamput	84
5.6	Yhteenvedo	86
6.	UV-säteily	88
6.1	Yleistä	88
6.2	Biologisia vaikutuksia	88
6.3	Muita vaikutuksia	90
6.3.1	Esineitä haalistava vaikutus	90
6.3.2	Vaikutus muoveihin	90
6.3.3	Käyttö teollisuudessa	91
6.4	Työterveydelliset suositukset	92
6.5	Monimetallilamppujen ja suurpainenatriumlamppujen UV-säteily ..	93

7.	Mittauksia koskevat suositukset ja ohjeet	97
7.1	Standardit	97
7.1.1	Suurpainenatriumlamput	97
7.1.2	Monimetallilamput	97
7.2	CIE-julkaisut	98
7.2.1	Valonheittimien valotekniset mittaukset	98
7.2.2	Katuvalaistuksen valaisimien valotekniset mittaukset	98
7.2.3	Valovoiman jakauman mittaus	99
7.3	IES-julkaisut	100
7.4	Yhteenveto	102
8.	Suoritetut mittaukset	103
8.1	Yleistä	103
8.2	Valontuoton ja väriominaisuuksien riippuvuus syöttöjännitteestä	104
8.2.1	Mittausjärjestelyt	104
8.2.2	Mittauksiloket	107
8.2.2.1	Monimetallilamppu Osram HQI-E 250/D	107
8.2.2.2	Monimetallilamppu Osram HQI-TS 150/WDL	111
8.2.2.3	Monimetallilamppu Osram HQI-TS 150/NDL	114
8.2.2.4	Monimetallilamppu Philips HPI-T 250 W	117
8.2.2.5	Monimetallilamppu GE Halarc 32 W	120
8.2.2.6	Yhteenveto monimetallilamppumittauksista	122
8.2.2.7	Värikorjattu suurpainenatriumlamppu Philips SON-T Comfort 250 W	124
8.2.2.8	Värikorjattu suurpainenatriumlamppu Philips SDW-T White SON 50 W	128
8.2.2.9	Yhteenveto värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen mittauksista	130
8.2.3	Virhelähteet	131
8.2.4	Yhteenveto	132
8.3	UV - säteilymittaukset	133
8.3.1	Mittausjärjestelyt	133
8.3.2	Mittauksiloket	135

9.	Lamppujen käyttö	137
9.1	Yleistä	137
9.2	Myymälät	138
9.2.1	Valaistukselle asetettavia vaatimuksia	138
9.2.2	Monimetallilamput	139
9.2.3	Värikorjatut suurpainenatriumlamput	141
9.3	Julkiset tilat	142
9.3.1	Valaistukselle asetettavia vaatimuksia	142
9.3.2	Monimetallilamput	143
9.3.3	Värikorjatut suurpainenatriumlamput	143
9.4	Toimistotilat ja koulut	144
9.4.1	Valaistukselle asetettavia vaatimuksia	144
9.4.2	Monimetallilamput	145
9.4.3	Värikorjatut suurpainenatriumlamput	146
9.5	Sisäurheilutilat	147
9.5.1	Valaistukselle asetettavia vaatimuksia	147
9.5.2	Monimetallilamput	147
9.5.3	Värikorjatut suurpainenatriumlamput	148
9.6	Ulkotilojen urheilualueet	149
9.6.1	Valaistukselle asetettavia vaatimuksia	149
9.6.2	Monimetallilamput	149
9.6.3	Värikorjatut suurpainenatriumlamput	150
9.7	Kaupunkivalaistus	151
9.7.1	Valaistukselle asetettavia vaatimuksia	151
9.7.2	Monimetallilamput	151
9.7.3	Värikorjatut suurpainenatriumlamput	152
9.8	Ulkotyöalueet	153
9.8.1	Valaistukselle asetettavia vaatimuksia	153
9.8.2	Monimetallilamput	153
9.8.3	Värikorjatut suurpainenatriumlamput	154
9.9	Teollisuustilat	155
9.9.1	Valaistukselle asetettavia vaatimuksia	155
9.9.2	Monimetallilamput	155
9.9.3	Värikorjatut suurpainenatriumlamput	156
9.10	TV- ja studiovalaistus	157
9.10.1	Monimetallilamput	157
9.11	Yhteenveto	158

10.	Valaistuskustannukset	160
10.1	Yleistä	160
10.2	Lähtötiedot	160
10.2.1	Valonlähteet ja valaisimet	161
10.2.2	Valaistuslaskelmat	162
10.2.3	Kustannustiedot	165
10.2.3.1	Lamput ja valaisimet	165
10.2.3.2	Asennuskustannukset	166
10.2.3.3	Energiakustannukset	166
10.2.3.4	Huoltokustannukset	166
10.3	Valaistusasennusten kustannukset	167
10.4	Kustannuslaskelmien tarkastelu	171
10.4.1	Lähtöarvojen vaikutus kustannuslaskelmiin	173
10.5	Yhteenvedo	175
11.	Yhteenvedo	176
	Lähdeluettelo	179
	Liitteet	

Liiteluettelo

Liite 1. Monimetallilampun kehityskaavio.

Käytetyt merkinnät

a	Annuiteettikerroin
A	Pinta-ala
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists; amerikkalainen työhygieenikkojärjestö
Al	Aluminium
Al_2O_3	Alumiinioksidi
BaO	Bariumoksidi
Br	Bromi
c	Valon nopeus
C	Kondensaattori
Ca	Kalsium
CAB	Selluloosa-asetobutyraatti
CaO	Kalsiumoksidi
Cd	Kadmium
Ce	Cerium
CIE	Commission Internationale de L'Eclairé; kansainvälinen valaistuskomissio
Cl	Kloori
Cs	Cesium
DC	Direct current; tasavirta
DNA	Deoxyribonucleic acid; deoksiribonukleiinihappo
Dy	Dysprosium
e	Energian hinta
E_{eff}	Painotettu tehotiheys
E_m	Keskimääräinen valaistusvoimakkuus
E_{UV-A}	UV-A-säteilyn tehotiheys
E_λ	Spektrinen tehotiheys
f	Säteilyn taajuus
Ga	Gallium
h	Planckin vakio
Hg	Elohopea
Ho	Holmium
H_l	Lampun hinta
H_{la}	Valaisimessa olevien lamppujen hankintahinnat, johon loistelamppuvalaisimessa lisätään sytyttimien hankintahinnat
H_v	Valaisimen hinta

H_{vv}	Valaisimessa olevien lamppujen vaihtokustannukset sekä valaisimen puhdistuskustannukset
i	Laskentakorkokanta
I	Lamppuvirta
I	Jodi
IEC	International Electrotechnical Commission
IES	Illuminating Engineering Society; amerikkalainen valaistusjärjestö
In	Indium
IP-säteily	Infrapunasäteily
I_{kal}	Kalibrointivirta
I_v	Liitäntälaitteen verkosta ottama virta
K_a	Vuotuismaksu
K_{as}	Asennuskustannukset
$K_{a,as}$	Asennuskustannusten vuotuismaksu
$K_{a,vl}$	Valaisimien ja valaisimessa olevien lamppujen hankintakustannusten vuotuismaksu
K_e	Vuotuiset energiakustannukset
K_h	Vuotuiset huoltokustannukset
K_{vl}	Valaisimen ja valaisimessa olevien lamppujen hankintakustannukset
k_ϕ	Alenemakerroin, joka ilmoittaa lamppujen vanhenemisen myötä tapahtuvan lamppujen valovirran pienenemisen
k_{25}	Alenemakerroin, jolla otetaan huomioon loistelamppujen valovirran pieneneminen niiden joutuessa toimimaan optimilämpötilastaan poikkeavassa ympäristön lämpötilassa
Li	Litium
n	Valaistuksen pitoaika
N	Valaisimien lukumäärä
Na	Natrium
Nd	Neodyymi
P	Lampputeho
Pb	Lyijy
PC	Polykarbonaatti
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti
PVC	Polyvinyylikloridi
P_k	Lampun ja liitäntälaitteen kokonaisteho
P_{max}	Maksimilampputeho
P_{min}	Minimilampputeho
p_{Na}	Natriumin höyrynpaine

$P_{v,k}$	Valaistuksen kokonaisteho
$P_{v,t}$	Valaistuksen tehotiheys
R_a	Yleinen värintoistoindeksi
Sc	Skandium
SiO ₂	Piidioksidi
Sm	Samarium
Sn	Tina
S_λ	Suhteellinen spektriherkkyyskerroin
T	Väriämpötila
ΔT	Väriämpötilan muutos
t	Aika
Th	Torium
Tl	Tallium
Tm	Tulium
t_a	Päivittäinen altistumisaika
t_{max}	Suurin sallittu käyttölämpötila
t_p	Lampun polttoikä
t_r	Lamppujen ryhmävaihtoväli
t_v	Lamppujen vuotuinen polttoaika
U	Syöttöjännite
U_n	Nimellisjännite
UV-säteily	Ultraviolettisäteily
UV-A	Ultraviolettisäteilyn aallonpituusalue
UV-B	Ultraviolettisäteilyn aallonpituusalue
UV-C	Ultraviolettisäteilyn aallonpituusalue
V	Lamppujännite
V_{max}	Maksimilamppujännite
V_{min}	Minimilamppujännite
WHO	World Health Organization; Maailman terveysjärjestö
WO ₃	Wolframioksidi
W_m	Energiatasolla m olevan elektronin energia
W_n	Energiatasolla n olevan elektronin energia
Z	Impedanssi
Zn	Sinkki
ZrO ₂	Zirkoniumoksidi
β	Lamppujen ja valaisimien sekä huonetilaa rajoittavien pintojen likaantumisesta johtuva alenemakerroin
ϵ	Valokvantti
η	Valotehokkuus

η_h	Valaistushyötysuhde
η_{rel}	Suhteellinen valotehokkuus
λ	Aallonpituus
$\Delta\lambda$	Kaistanleveys
ϕ	Valovirta

1. Johdanto

Monimetallilamput ja värikorjatut suurpainenatriumlamput ovat suhteellisen uusia lampputyyppejä. Suomessa näitä lamppuja on ollut markkinoilla noin 1980-luvun alusta lähtien. Pienitehoiset monimetalli- sekä värikorjatut suurpainenatriumlamput ovat tulleet markkinoille viime vuosien aikana ja niiden käyttö lisääntynee lähivuosina.

Monimetallilamput kehitys lähti liikkeelle yrityksestä parantaa elohopeahöyrylamput värintoisto-ominaisuuksia. Tässä onnistuttiin lisäämällä lamput purkausputkeen elohopean rinnalle metallien halogeeniyhdisteitä. Tällä hetkellä on markkinoilla useita väriominaisuuksiltaan erityyppisiä monimetallilamppuja väriominaisuuksien riippuessa purkausputkessa käytetyistä metalliyhdisteistä. Monimetallilamppujen valotehokkuus on elohopealamppujen valotehokkuutta korkeampi.

Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen parannettu värintoisto tavalliseen suurpainenatriumlamppuun verrattuna perustuu purkausputkessa olevan natriumin korotettuun höyrynpaineeseen. Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valo on lämminsävyistä ja lamppujen värintoisto-ominaisuudet ovat huomattavasti tavallista suurpainenatriumlamppua paremmat. Vaikka natriumin höyrynpaineen korottaminen on merkinnyt värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valotehokkuuden alenemista tavalliseen suurpainenatriumlamppuun verrattuna, on värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valotehokkuus kuitenkin hyvä.

Tietoa monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen toiminnasta nimellisistä poikkeavissa käyttöolosuhteissa on suhteellisen vähän. Lamppujen käyttäytyminen verkkojännitevaihteluissa ja säädinkäytössä kuten myös polttoasennon ja ympäristön lämpötilan vaikutus lamppujen toimintaan kiinnostaa käyttäjiä.

Eriyypiset käyttökohteet asettavat valaistukselle ja valonlähteille erilaisia vaatimuksia. Monimetallilamput ja värikorjatut suurpainenatriumlamput soveltuvat sekä sisä- että ulkokäyttöön. Käyttökohteen valonlähdevalintoja tehtäessä on kuitenkin aina tarkoin selvitettävä kunkin lampputyypin ominaisuudet ja soveltuvuus tarkasteltavaan kohteeseen.

2. Lamppujen kehityksen historiaa

2.1 Monimetallilampun kehitys

Monimetallilampun kehitys lähti liikkeelle yrityksestä parantaa elohopeahöyrylampun värintoistoa. Korkeapaineisessa elohopeassa tapahtuvan sähköpurkauksen tuottama valo sisältää pääasiassa muutamia voimakkaita säteilyhuipuja spektrin sinisellä, sini-vihreällä sekä vihreällä alueella. Purkauksen valo on sinertävän valkoista. Valon värintoistoa voidaan parantaa päällystämällä elohopeahöyrylampun ulkokupu loisteaineella, joka muuntaa UV-alueen säteilyn näkyväksi valoksi punaiselle alueelle. Valon värintoisto-ominaisuudet ovat loisteaineen käytöstä huolimatta kuitenkin heikohkot yleisen värintoistoindeksin ollessa tavallisesti luokkaa $R_a=40$. Elohopealampun valotehokkuus on 40 - 60 lm/W. Monimetallilampun kehityksen ajatuksena oli lisätä purkausputken kaasutäytökseen elohopean rinnalle muita metalleja, jolloin lisättyjen metallien höyrystyessään lähettämä säteily täyttäisi aukkoja elohopealampun epäjatku- vassa spektrissä.

1930-luvulla elohopealampun purkausputkeen lisättiin kadmiumia ja sinkkiä. Tällöin säteily spektrin punaisella alueella lisääntyi, jolloin myös valon väriominaisuudet paranivat. Lampun valotehokkuus kuitenkin laski samalla kun myös lampun elinikä lyheni huomattavasti, mikä johtui metallien reagoinnista purkausputkimateriaalin kanssa.

Puhtaiden metallien lisääminen purkausputkeen elohopean rinnalle ei tuonut ratkaisua uuden lampun kehitykseen. Syynä on se, että useimpien metallien saattaminen höyrystyneeseen tilaan vaatii metallien alhaisesta höyrynpaineesta johtuen hyvin korkean lämpötilan ja metallit taas alkavat reagoida korkeissa lämpötiloissa purkausputkimateriaalina käytetyn kvartsilasin kanssa. Metallien lisääminen niiden halogeeniyhdisteiden muodossa toi ratkaisun edellä esitettyyn ongelmaan. Metallien halogeeniyhdisteillä, *metallihalogenideilla*, on suuremmat höyrynpaineet kuin puhtailla metalleilla samassa lämpötilassa, jolloin purkausputken lämpötila voidaan pitää sellaisena, ettei haittavaikutuksia purkausputkimateriaalin suhteen esiinny. Purkausputkessa tapahtuvan kiertoprosessin seurauksena metalliatomit ja halogeenit ovat purkausputken seinämän läheisyydessä yhdisteenä, jolloin metallit eivät pääse reagoimaan seinämämateriaalin kanssa.

Ensimmäiset monimetallilamput valmistettiin 1960-luvun vaihteessa. Ne perustuivat natriumin, talliumin ja indiumin jodidiyhdisteiden lisäämiseen elohopean rinnalle. Ensimmäiset lamput olivat teholtaan 400 - 2000 W. Niiden värilämpötila oli alueella 3300 - 4700 K ja yleinen värintoistoindeksi $R_a=55 - 65$ [1]. Lamppujen valotehokkuus, 80 - 100 lm/W, oli huomattavasti parempi kuin elohopeahöyrylampan. Lamput muistuttivat ulkomuodoltaan hyvin paljon elohopeahöyrylamppuja. Niiden ulkokupu oli ellipsoidin tai sylinterin muotoinen ja kanta oli Edison-kierrekanta. Lamppuja käyttösovellutukset olivat pääasiassa ulkokäyttö sekä teollisuustilojen ja urheilustadionien valaistus.

1960-luvulla julkaistuissa lehtiartikkeleissa lampusta käytettiin mm. nimityksiä *elohopeahalogeenilamput* sekä *elohopeajodidilamput*.

Pian natrium-tallium-indium-lampan jälkeen alettiin kokeilla myös muiden metallien halogeeniyhdisteiden lisäämistä elohopeapurkaukseen. Eri maametallien samoin kuin myös muiden alkuaineryhmien metallien käyttöä tutkittiin. Uuden lampan nimeksi vakiintui englanninkielinen nimitys *metal halide lamps*, Suomessa nimitys *monimetallilamput*.

Tähän päivään mennessä on lähes kaikkien alkuaineiden jaksollisen järjestelmän metallien käyttöä monimetallilamputta tutkittu. Osa tutkimuksista on johtanut lamppujen kaupallisiin sovellutuksiin. Lamppujen valotekniset ominaisuudet poikkeavat huomattavastikin toisistaan eri metallien purkaukselle antamien ominaisuuksien johdosta. Lampan kehitystä voidaan seurata jakamalla lamput eri ryhmiin purkausputkessa käytettyjen pääasiallisten metallien mukaan. Liitteessä 1 on havainnollistettu monimetallilampan kehitystä lampan kehityksen aikana käytetyistä metalleista erottuneisiin pääryhmiin perustuen. Kunkin ryhmän lampuista on kerätty poimintoja valaistusalan lehtiartikkeleista ja muista julkaisuista, joissa on esitetty tietoa eri puolilla maailmaa tutkimuksen tuloksena syntyneistä lampuista. Osa tarkastelluista lampuista on johtanut kaupallisiin sovellutuksiin. Kussakin ryhmässä on esitetty julkaistuja tietoja lamppujen valoteknisistä ominaisuuksista kehitysajan funktiona 1960-luvun alusta tähän päivään asti.

Vaikka liitteessä on esitetty vain osa lampan kehityksen aikana syntyneistä monimetallilampuista ja niiden ominaisuuksista, voidaan havaita monimetallilampuperheen muodostavan varsin laajan kokonaisuuden. Yhden lampputyypin sijaan on syntynyt useita lampputyyppejä erilaisine valoteknisine ominaisuuksineen. Lamppujen ominaisuuksista ei voida tehdä yksikäsitteistä yhteenvetoa.

Kun alunperin lähdettiin kehittämään lamppua, jonka värintoisto olisi elohopealamppua parempi, voidaan todeta tässä onnistutun jopa erinomaisesti. Lisäksi monimetallilampun valotehokkuus on lähes kaikilla tarkastelluilla lampputyypeillä elohopealamppun valotehokkuutta parempi, useilla lampuilla jopa kaksinkertainen elohopealamppuun verrattuna. Markkinoilla tällä hetkellä olevien monimetallilamppujen valotehokkuus on noin 60-100 lm/W, elohopealamppun valotehokkuuden ollessa noin 40-60 lm/W. Monimetallilamppujen värilämpötilavalikoima on laaja. Tehovalikoima ulottuu 32 W pienikokoisesta lampusta aina valonheitinkäyttöön tarkoitetun erikoislampun 12 000 W tehoon asti.

Monimetallilamppujen käyttöalue on kehityksen myötä laajentunut. Kierrekantalamppujen rinnalle on syntynyt kuhunkin käyttötarkoitukseen soveltuvia erilaisia erikoiskantalamppuja. Monimetallilampuista löytyy tänä päivänä lampuja, jotka soveltuvat mm. ulkoalue- ja julkisivuvalaistukseen, teollisuustila- ja urheiluhallivalaistukseen, myymälä- ja toimistovalaistukseen sekä TV-, studio- ja teatterivalaistukseen. Erikoislampuista mainittakoon tekniseen erikoiskäyttöön soveltuvat UV-säteilijät.

Vaikka useimpien metallien käyttöä monimetallilampun valoa tuottavina aineina on jo tutkittu, on olemassa vielä useita potentiaalisia purkausputken täytösaineyhdistelmiä. Useamman metallin muodostamat ns. kompleksiyhdisteet muodostavat yhden mahdollisen tulevaisuuden lamppujen perustan. Lisäksi tutkitaan mm. halogeeniryhmän eri alkuaineiden käyttöä. Olemassa olevien lamppujen ominaisuuksia pyritään jatkuvasti parantamaan. Monimetallilampun kehitys jatkuu voimakkaana [1, 27, 28].

2.2 Suurpainenatriumlampun kehitys

Natriumpurkaukseen perustuvan purkauslampun kehitys alkoi 1920-luvulla, jolloin valmistettiin ensimmäiset pienpaineiseen natriumpurkaukseen perustuvat lamput. Näissä pienpainenatriumlampuissa natriumin höyrynpaine purkausputkessa on noin 0.5 Pa. Lampun valo on lähes monokromaattista keltaista valoa valontuoton perustuessa natriumin keltaiseen resonanssisäteilyyn aallonpituuksilla 589.0 nm ja 589.6 nm, jotka ovat lähellä suhteellisen silmäherkkyyssäyrän maksimia. Pienpainenatriumlampun valotehokkuus on suurempi kuin minkään muun valonlähteen.

Pienpainenatriumlamput olivat ensimmäiset tievalaistukseen käytetyt purkauslamput. Monokromaattisen valon etuna on kontrastien erottuminen selvästi,

jolloin esineiden ja hahmojen tunnistaminen helpottuu. Monokromattinen valo tunkeutuu myös sumun läpi ilman siroamista. Nämä ominaisuudet yhdessä korkean valotehokkuuden kanssa ovat vakiinnuttaneet pienpainenatriumlampun aseman tie- ja katuvalaistuksen valonlähteenä. Valon väriominaisuudet ovat kuitenkin huonot, mistä johtuen pienpainenatriumlampun käyttömahdollisuudet ovat hyvin rajoitetut.

Natriumpurkauksen väriominaisuuksia voidaan parantaa natriumin höyrynpainetta nostamalla. Natriumin höyrynpaineen kasvaessa purkauksen spektri levenee ja valon keltaisuus vähenee. Suurpainenatriumlampun kehitys alkoi varsinaisesti 1950-luvulla. Kehitystä hidastivat monet tekniset ongelmat lampun rakenteen toteuttamisessa. Natriumin korkean höyrynpaineen saavuttamiseksi on purkausputken seinämän lämpötilan oltava huomattavasti suurempi kuin pienpainenatriumlampuilla. Tästä johtuen oli lähdettävä etsimään uutta purkausputkimateriaalia, joka korkean lämpötilan lisäksi kestää kuuman natriumhöyryn vaikutukset. Lisäksi oli pystyttävä kehittämään kaasutiiviit purkausputken läpiviennit, jotka ovat resistiivisiä kuuman natriumhöyryn vaikutuksille.

Ensimmäiset laboratoriolamput valmistettiin 1950-luvun lopulla. Markkinoille suurpainenatriumlamput ilmestyivät vuoden 1965 aikoihin USA:ssa, Isossa Britanniassa sekä Hollannissa. Ensimmäinen lamppu oli teholtaan 400 W ja sen valotehokkuus oli 100 lm/W [30]. Myöhemmin on suurpainenatriumlamppujen tehovalikoima huomattavasti laajentunut samalla kun valotehokkuutta on pystytty nostamaan. Suurpainenatriumlamppujen käyttökohteita ovat mm. tie- ja katu-, ulkoalue-, julkisivu- sekä teollisuusvalaistus.

Vaikka suurpainenatriumlampun väriominaisuudet ovat huomattavasti paremmat pienpainenatriumlamppuun verrattuna, ei suurpainenatriumlamppu kuitenkaan sovi kohteisiin, joissa värintoistolle asetetaan korkeat vaatimukset. Suurpainenatriumlampun säteily on keskittynyt spektrin keltaiselle ja punaiselle alueelle valon yleisvärisävyn ollessa kellanvalkoinen. Säteilyn yleinen värintoistoindeksi $R_a = 20 - 25$.

Nostamalla edelleen suurpainenatriumlampun purkausputkessa vallitsevaa natriumin höyrynpainetta levenee säteilyn spektri, jolloin lampun väriominaisuudet paranevat. Tältä pohjalta lähdettiin kehittämään parannetun värintoiston omaavaa suurpainenatriumlamppua. 1980-luvun alussa tulivat markkinoille ensimmäiset natriumpurkaukseen perustuvat lamput, joiden värintoistominaisuudet olivat huomattavasti tavallista suurpainenatriumlamppua paremmat. Natriumin höyrynpaine purkausputkessa on noin 3 - 6-kertainen tavalliseen suurpainenatriumlamppuun verrattuna. Tämä merkitsee huomattavasti

parempia valon väriominaisuuksia. Lamppujen yleinen värintoistoindeksi $R_a = 60 - 85$ ja värilämpötila $2150 - 2500$ K. Näiden lamppujen nimitykseksi on Suomessa vakiintunut *värikorjatut suurpainenatriumlamput*.

Vaikka natriumin höyrynpaineen nostaminen on merkinnyt lampun valotehokkuuden alenemista, on värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valotehokkuus kuitenkin korkea. Lampputehosta ja värintoistoindeksistä riippuen värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valotehokkuus on $40 - 100$ lm/W. Väriominaisuuksien paraneminen on merkinnyt natriumpurkaukseen perustuvien lamppujen käyttöalueen laajenemista. Värikorjatut suurpainenatriumlamput soveltuvat kohteisiin, joissa värintoistolle asetetaan korkeat vaatimukset. Ne soveltuvat sekä sisä- että ulkokäyttöön. Lamppujen käyttökohteita ovat mm. erilaiset julkiset tilat, myymälät, vaativat teollisuustilat, julkisivuvalaistus sekä kaupunkikeskustojen yleisvalaistus [29, 30].

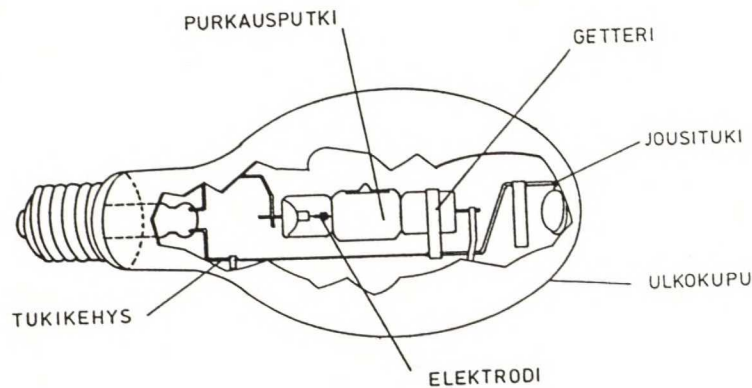
3. Lamppujen rakenne

3.1 Monimetallilamput

3.1.1 Yleistä

Monimetallilamppu on valonlähde, jonka valontuotto perustuu purkausputkessa tapahtuvaan korkeapaineiseen kaasupurkaukseen. Lampun rakenteen perustana olevan purkausputken ympärille on luotu sellaiset olosuhteet, että lampun toiminta on mahdollisimman vakaata ja valontuotto lähellä optimia.

Kuvassa 3.1 on esitetty kierrekantaisen, ellipsoidin muotoisella ulkokuvulla varustetun monimetallilampun rakenne. Kaasupurkaus tapahtuu purkausputkessa elektrodien välillä. Elektrodit on yhdistetty molybdeeniliuskojen avulla läpivientijohtimiin. Tukikehys pitää purkausputkea paikoillaan. Jousituki vaimentaa lamppuun kohdistuvia iskuja ja tärinää. Purkausputki on sijoitettu ulkokuvun sisään. Ulkokuvun sisällä oleva getteri pitää lampun sisätilan vapaana epäpuhtauksista.



Kuva 3.1 Monimetallilampun rakenne.

Lampun rakenteen yksityiskohtia sekä käytettyjen materiaalien ominaisuuksia käydään läpi seuraavassa.

3.1.2 Purkausputki

Monimetallilampun purkausputken materiaalina käytetään kvartsilasia (SiO_2). Kvartsilasilla on hyvä valon läpäisykyky aallonpituusalueella 185 - 4000 nm. Kvartsin sulamispiste on noin 1350°C . Purkausputken korkein sallittu lämpötila on kuitenkin noin 950°C . Tätä korkeammissa lämpötiloissa paine-ero purkausputken sisä- ja ulkopuolella saattaa aiheuttaa purkausputken muotoutumista. Mainittu lämpötila saavutetaan yleensä purkausputken seinämän tehokuormituksen ollessa noin 20 W/cm^2 . Lisäksi tiettyjen metalliatomien diffuusio pois purkausputkesta lisääntyy korkeissa lämpötiloissa [29].

Lampun palaessa ei kaikki aine ole purkausputkessa höyrystyneenä, vaan sijaitsee tiivistyneenä purkausputken alhaisimman lämpötilan alueella ns. kylmäpisteen lähellä. Purkausputken kylmäpisteen lämpötila määrää aineiden höyränpaineen ja sitä kautta lampun valotekniset ominaisuudet.

Purkauskanavan keskiosan lämpötila on noin 5700°C . Purkausputken kylmäpisteen lämpötila on tyypillisesti noin 750°C . Purkausputken suunnittelussa on pyrittävä mahdollisimman tasaiseen lämpötilajakaumaan purkausputken sisällä. Purkausputken päihin sijoitetaan usein zirkoniumoksidia (ZrO_2) olevat lämpöä heijastavat kerrokset. Ne lämmittävät kylmiä alueita elektrodien lähellä ja estävät siten metallien halogenideja tiivistymästä näille alueille.

Purkausputken suunnittelussa on huomioitava myös purkausputken muoto. Konvektio ja diffuusio saattavat johtaa kevyempien ja raskaampien täytösainesten erottumiseen purkausputkessa. Tämä on oleellista erityisesti pystysuorassa asennossa toimivilla lampuilla. Täytösainesten erottumisesta on seurauksena valossa ilmenevät värerot purkausputken pituussuunnassa. Purkausputken muotoilun avulla voidaan estää täytösainesten erottuminen.

Koska lampun kylmäpisteen lämpötilan muutokset näkyvät muutoksina lampun valontuotossa, on kylmäpisteen lämpötila pyrittävä pitämään mahdollisimman tasaisena. Tämä rajoittaa lampun polttoasentoa, jonka muuttuessa muuttuvat usein sekä kylmäpisteen paikka että lämpötila. Valmistajat ilmoittavat kullekin lampulle soveltuvan polttoasennon sekä alueen, jossa polttoasento saa vaihdella lampun valoteknisten ominaisuuksien muuttumatta [29].

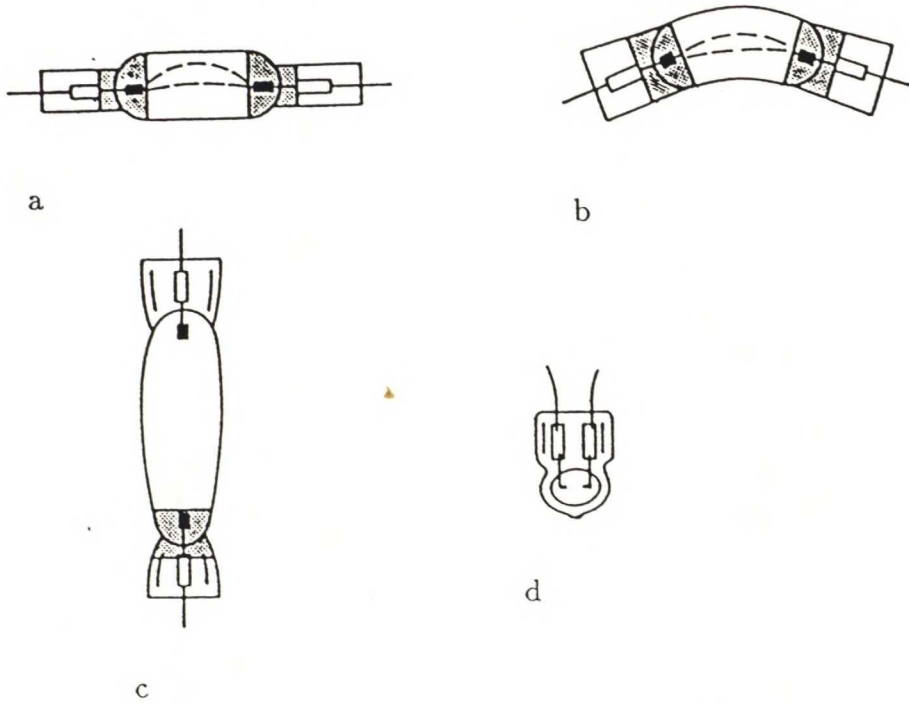
Vaakasuorassa asennossa olevilla purkausputkilla kylmäpiste sijaitsee tavallisesti purkausputken alaosassa elektrodien välissä. Kuvassa 3.2 a purkauskaaren

taipuminen keskeltä ylöspäin vaakasuorassa polttoasennossa aiheuttaa epätasaisen lämpötilajakauman purkausputkeen. Taipuminen aiheuttaa purkausputken yläosan ylikuumentumisen, jolloin yläosan lämpötila lähenee kvartsilasin termistä kestävyysrajaa. Lämpötila purkausputken alaosassa on huomattavasti alhaisempi, mikä lisää metalliyhdisteiden tiivistymistä putken alaosaan. Tämä vaikuttaa purkaukseen osallistuvien aineiden määrään ja tasaisuuteen ja siten valon väriin ja valotehokkuuteen [7, 29].

Kuvassa 3.2 b on purkausputken taivuttamisella otettu huomioon purkauskäärän taipuminen ylöspäin vaakasuorassa polttoasennossa. Tästä on seurauksena tasaisempi purkausputken seinämän lämpötila, jolloin purkaukseen osallistuvien täytösaineiden määrä sekä niiden tasaisuus purkauksessa lisääntyy. Tämä lisää valon värin tasaisuutta ja parantaa valotehokkuutta. Purkausputken seinämän tehokuormitus voi olla suurempi kuin kuvan 3.2 a purkausputkella ilman kuumimman kohdan yllirasittumista. Tämä merkitsee suurempaa valotehokkuutta. Purkausputken polttoasennon on oltava vaakasuora. Purkausputken kylmäpiste sijaitsee purkausputken toisessa päässä elektrodin lähellä [31].

Kuvan 3.2 c purkausputken polttoasento on pystysuora. Purkausputki on pyöristetty keskiosasta. Tämän avulla saadaan eliminoidua konvektiovirtausten aiheuttama täytösaineiden erottuminen purkausputkessa, jolloin värierot purkausputken pituussuunnassa tasoittuvat [7].

Kuvan 3.2 d pyöristetyn purkausputken virtaläpiviennit on sijoitettu vierekkäin, jolloin lämpöhäviöt läpivienneissä rajoittuvat yhteen kohtaan purkausputkea. Elektrodit on sijoitettu siten, että purkauksen säteily lämmittää alhaisimman lämpötilan aluetta läpivientien ympäristössä. Kylmäpisteen lämpötila pysyy lähes muuttumattomana kaikissa polttoasunnoissa [7].



Kuva 3.2 Erilaisia monimetallilampun purkausputkia.

3.1.3 Purkausputken täytös

Purkausputken täytös koostuu elohopeasta, eri metallien halogeeniyhdisteistä sekä pienestä määrästä jalokaasua.

Pääasiallisina valoa tuottavina aineina ovat halogeeniyhdisteiden metalliatomit. Purkauksessa voidaan käyttää useita erilaisia metallien halogeeniyhdisteitä. Käytettyjä metalliyhdisteitä ja niiden ominaisuuksia käsitellään luvussa 4.4.2.

Elohopea toimii purkauksessa ns. puskurikaasuna. Metallien halogeeniyhdisteet vaativat höyrystyäkseen korkeamman lämpötilan kuin purkausputkessa oleva elohopea. Tarvittava lämpötila saadaan aikaan korkeapaineisen elohopeapurkauksen avulla. Purkausputkessa oleva elohopea on lampun palaessa kokonaan höyrystyneenä. Lamppujännite määräytyy pääasiassa elohopean höyrönpaineen perusteella.

Jalokaasun avulla alennetaan purkauksen syttymisjännitettä. Jalokaasuna käytetään argonia tai vaihtoehtoisesti neonin ja argonin seosta (ns. Penning-seos).

Käyttämällä neon/argon-seosta on lampun syttymisjännite alhaisempi argonin käyttöön verrattuna. Neon/argon-seoksen käyttö alentaa kuitenkin hieman lampun valotehokkuutta argonin käyttöön verrattuna.

Valmistuksen yhteydessä on kiinnitettävä erityistä huomiota yhdisteiden puhtauteen sekä estettävä kosteuden pääsy purkausputkeen. Purkausputkessa olevasta vedestä vapautuu vetyä elektrodien hapettumisen seurauksena. Vety nostaa lampun syttymisjännitettä [29].

3.1.4 Purkausputken virtaläpiviennit ja elektrodit

Purkausputki on suljettu puristamalla. Purkausputken virtaläpivientien kaasutiiviys on erittäin tärkeää. Koska kvartsin lämpölaajenemiskerroin on huomattavasti pienempi kuin minkään läpivientijohtimena käytetyn sähköä johtavan materiaalin, on läpivientijohtimien ja elektrodien väliin sijoitettu ohuet molybdeeniliuskat kaasutiiviin läpiviennin varmistamiseksi [29].

Elektrodimateriaalina käytetään volframia. Volframin sulamispiste 3410°C on korkein minkä tiedetään millään metallisella alkuaineella olevan. Volframin kiehumispiste on 5927°C [32]. Korkeiden sulamis- ja kiehumispisteiden johdosta elektrodien höyrystyminen lampun syttymisen ja palamisen aikana on suhteellisen hidasta. Elektrodi muodostuu tavallisimmin volframitapin ympärille kierretystä volframilangasta.

Volframilangan ja -tapin väliin sijoitetaan emissioainetta, jonka tehtävänä on alentaa elektrodien työfunktia eli energiaa, jolla elektronit irtoavat elektrodeilta. Monimetallilampuissa ei emissioaineena voida käyttää maaalkalimetallien oksideja kuten muissa purkauslampuissa, sillä nämä reagoivat purkausputkessa olevan jodin kanssa. Emissioaineena käytetään toriumia tai toriumoksidia. Lampuissa, joissa käytetään metalleina dysprosiumia ja talliumia tai natriumia ja skandiumia, voidaan emissioaineena käyttää vastaavasti dysprosiumoksidia tai skandiumoksidia [33].

3.1.5 Getteri

Ulkokuvun sisällä oleva kaasuja absorboiva getteri pitää purkausputken ja ulkokuvun välisen tyhjän tai kaasutäytöksen vapaana epäpuhtauksista, joita vapautuu lampun toiminnan aikana. Monimetallilampun getterimateriaalina käytetään mm. zirkoniumia ja alumiiniumia.

3.1.6 Ulkokupu

Ulkokuvun tehtävänä on toimia purkausputken suojana sekä estää purkausputken lämpöhävikkiä. Ilman ulkokuvun käyttöä vaaditaan purkausputkelta lämpöhävikin vuoksi suurempi toimintalämpötila, mikä lyhentää lampun elinikää. Paras lämpöeristys saadaan kun purkausputken ja ulkokuvun väliin jätetään tyhjä. Tällöin ulkokuvun sisällä oleva kaasuja absorboiva getteri pitää yllä tyhjää.

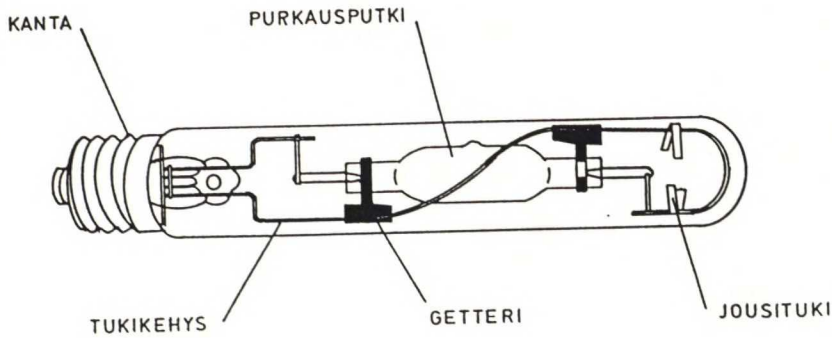
Turvallisuussyistä käytetään purkausputken ja ulkokuvun välillä kuitenkin usein kaasutäytöstä estämään purkausputken särkyessä muuten tapahtuva vaarallinen räjähdys. Kaasutäytöksenä käytetään typpeä mikäli purkausputkessa oleva jalokaasu on argonia. Kun purkausputkessa oleva jalokaasu on neonin ja argonin seosta käytetään kaasutäytöksenä typen ja neonin seosta. Myös tällöin käytetään ulkokuvun sisällä getteriä pitämään kaasutäytös vapaana epäpuhtauksista.

Ulkokuvun materiaalina käytetään borosilikaattilasiasia eli kovalasia tai vaihtoehtoisesti kvartsilasiasia. Kvartsilasiasia käytetään ulkokuvun materiaalina mm. kaksisikantaisilla monimetallilampuilla, joilla ulkokuvun sulkeminen tapahtuu purkausputken sulkemisen lailla puristamalla. Kvartsilasi soveltuu tähän valmistusmenetelmään, sillä se kestää hyvin lämpötilavaihteluita ja lämpövaikutuksia [29].

3.1.7 Lampputyypit

3.1.7.1 Kierrekantalamput

Ensimmäiset valmistetut monimetallilamput olivat kierrekantalamppuja, jotka muistuttivat ulkomuodoltaan hyvin paljon elohopealamppuja. Ulkokupu on kierrekantalampuissa yleensä sylinterimäinen tai ellipsoidin muotoinen, myös paraboloidinmuotoisia ulkokupuja valmistetaan. Ulkokuvun materiaalina kierrekantalampuissa käytetään borosilikaattilasiasia. Kuvassa 3.3 on esitetty 250 W sylinterinmuotoisen lampun rakenne.



Kuva 3.3 E40-kantainen 250 W monimetallilamppu.

Purkausputken sisäänvientijohtimiin yhdistetyt kannattimet tukevat lampun purkausputkea ja suojaavat sitä iskuilta ja tärinältä. Purkausputkessa olevat pienikokoiset natriumionit kulkeutuvat helposti purkausputken läpi. Natriumhävikin osuus on erityisen suuri, mikäli metalliset kannatinjohtimet kulkevat lähellä purkausputkea. Kannatinjohtimet muodostavat kulkutien valosähkövirralle, joka johtaa natriumin kulkeutumiseen pois purkausputkesta elektrolyysin seurauksena. Haitallista natriumhävikkiä voidaan estää sijoittamalla kannatinjohtimet etäälle purkausputkesta tai päällystämällä ne keraamisella suojalla [7].

Ellipsoidin muotoisen ulkokuvun sisäpinta voidaan päällystää valoa hajoittavalla jauheella lampun luminanssin pienentämiseksi. Absorptiohäviöt pienentävät tällöin lampun valovirtaa muutamalla prosentilla.

Lampun tehosta ja rakenteesta riippuen käytetään purkausputken ja lampun kannan välissä lämpösuojailevaa suojaamaan kantaa lämpenemiseltä.

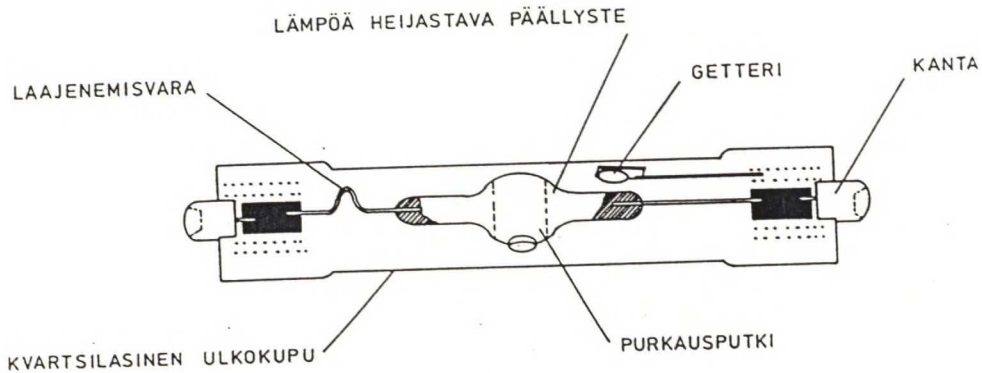
Kantana E40-kantoja. Lamppujen tehojakauma on 250 - 3500 W. Värilämpötilat vaihtelevat käytetyistä metalliyhdisteistä riippuen. Kierrekentalamppujen värilämpötilat ovat välillä 3000 - 6000 K.

3.1.7.2 Erikoiskantalamput

Myöhemmin on tullut markkinoille useita erityyppisiä lamppuja, joiden ulkomuoto poikkeaa em. lampuista ja joiden tehovalikoima ulottuu myös pienitehoisiin lamppuihin.

Kaksikantalampun ulkokupu on suljettu molemmista päistä puristamalla ja ulkokuvun molempiin päihin on sijoitettu virtaläpiviennit, kuva 3.4. Kanta on tyyppiä R7s tai Fc2. R7s-kantaisten lamppujen tehot ovat 70 ja 150 W ja värilämpötilat 3000 K tai vaihtoehtoisesti 4300 K. Fc2-kantaisten lamppujen tehot ovat 250, 400 ja 1000 W ja värilämpötilat 4300 - 4500 K. Lisäksi on 250 ja 400 W Fc2-kantaisia lamppuja, joiden värilämpötila on 5000-6000 K [34, 35, 36].

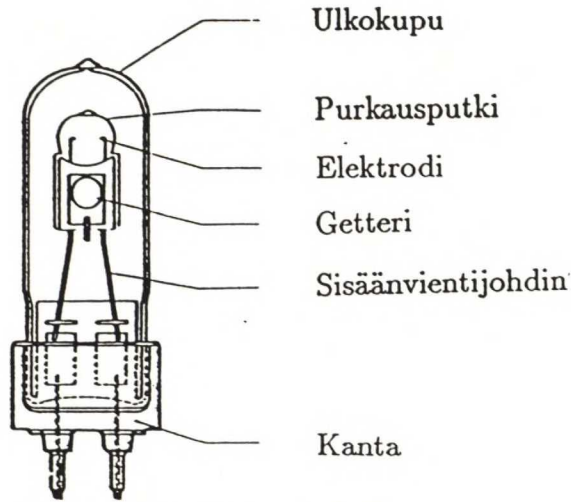
Pienitehoiset (70 - 250 W) kaksikantalamput on suunniteltu siten, että niitä on poltettava aina valaisimessa, sillä muuten ne eivät saavuta oikeata toimintalämpötilaa ja -painetta. Lamppujen ulkoinen lämpötila valaisimessa on noin 150 °C [37].



Kuva 3.4 R7s-kantainen 150 W kaksikantalamppu.

Kuvan 3.5 lampun purkausputki on ellipsoidin muotoinen. Lampun etuna on pienen koon lisäksi vapaa polttoasento (vrt. luku 3.1.1). Kanta on tyyppiä G12. Lamppujen tehot ovat 35, 70 ja 150 W. Värilämpötila on 3000 K [34].

Kaksikantalamppujen ja G12-kantaisten lamppujen ulkokuvun materiaalina käytetään kvartsilasia. Lamppujen ulkokuvut suljetaan valmistuksen yhteydessä puristamalla. Kierrekantalamppujen ulkokuvun materiaalina käytetty kovalasi ei kestäisi puristusta.



Kuva 3.5 G12-kantainen 70 W lamppu.

3.1.7.3 32 W monimetallilamppu DC-käyttöön

Uusiin markkinoille tullessiin lamppeihin kuuluu 32 W tasasähköllä toimiva monimetallilamppu. Lamppu liitetään vaihtojänniteverkkoon elektronisella liitälaitteella, jonka sisältämän tasasuuntausosan avulla vaihtojänniteverkon suuret muunnetaan lampulle meneviksi tasasuureiksi. Liitälaitte toimii lampun virranrajoittimena. Liitälaitteeseen on myös integroitu sytytinpiiri, joka antaa lampulle sytytysvaiheessa noin 1000 V tasajännitepiikin. Lampun tasajännitekäytön etuna on valon välkynnän eliminointuminen.

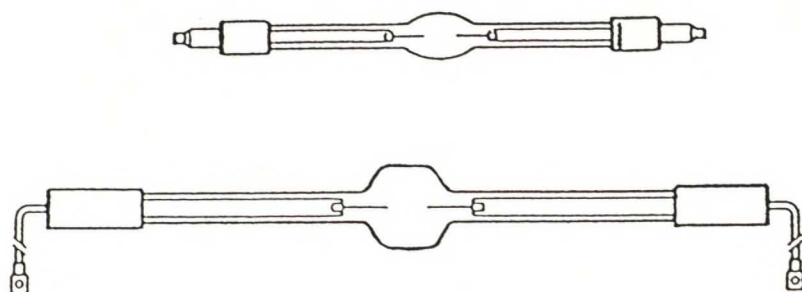
Lampun värilämpötila on 3000 K. Lampun kanta on E27 [38].

3.1.7.4 Kompaktilamput erikoiskäyttöön

Erityisesti TV- ja studiovalaistuksen valonlähteeksi on kehitetty näiden käyttöjen asettamat erityisvaatimukset täyttävä monimetallilamppu. Lamppuja käytetään erilaisissa valonheitinsovellutuksissa, joissa valon suuntaus toteutetaan linssien ja peilien avulla. Lampussa ei ole ulkokupua, jolloin valon suuntaus helpottuu. Purkausputkessa vallitsevasta korkeasta höyrynpaineesta johtuen lampulle ovat ominaisia hyvä valontuotto sekä hyvät valon väriominaisuudet. Purkausputki on pienikokoinen ja elektrodien välimatka lyhyt. Purkausputken korkeasta tehokuormituksesta johtuen lampun elinikä on lyhyt, tyypillisesti 250 - 1000 h.

Purkauskanavan kirkkaus on suuri. Lamppujen väriominaisuudet täyttävät väritelevisioidinnin ja filmauksen valaistukselle asettamat vaatimukset. Lamppujen värintoistoindeksi $R_a > 90$ ja värilämpötila on 5600 - 6000 K.

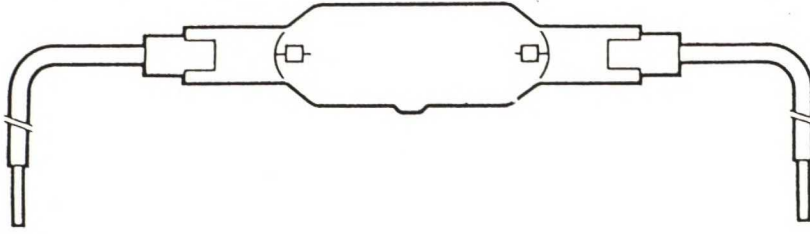
Lamppujen tehoalue on 200 - 12 000 W. Kuvassa 3.6 on esitetty 2 500 W ja 12 000 W lampun rakenne. Lamppujen purkausputki on pyöristetty keskel-
tä. Purkausputken virtaläpivientien ja elektrodien välillä olevat pitkät molyb-
deeniliuskat on sijoitettu putkimaiseen jatkettuun läpivientiosaan. Rakennetta
käytetään, jotta voidaan minimoida molybdeeniliuskojen hapettuminen ja silti
ylläpitää purkausputken seinämien korkea lämpötila. Eritehoisten lamppujen
kantoina käytetään kullekin teholle erilaista erikoiskantaa [39].



Kuva 3.6 2 500 W ja 12 000 W kompaktilamppu.

3.1.7.5 UV-säteilijät tekniseen käyttöön

Tekniseen erikoiskäyttöön soveltuvien monimetallilamppujen spektri sisältää
pääasiassa UV-A-säteilyä aallonpituuksilla 315-400 nm ja osaksi myös säteilyä
UV-B-alueella 280-315 nm sekä sinisen valon alueella 400-450 nm. Lamppuja
käytetään mm. liimojen, lakkojen ja erikoismuovien kovetukseen, valoherkkien
materiaalien valotukseen, kemiallisiin reaktioihin sekä nopeutettuihin vanhen-
nusprosesseihin.



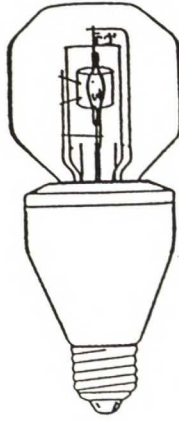
Kuva 3.7 UV-säteilijänä toimiva 1000 W monimetallilamppu.

Lamppuja suositellaan käytettäväksi vain niitä varten suunnitelluissa laitteissa. Koska spektriä hallitsevat UV-alueen aallonpituudet on lamppujen säteily vaarallista ihmisilmälle ja iholle.

Lamppujen tehoalue on 400 - 4000 W. Lamppujen kannat ovat erilaisia erikoiskantoja.

3.1.7.6 Tulevaisuuden lampputyypit

USA:ssa on kehitetty 50 W monimetallilamppu, jossa lampun virranrajoittimena toimiva kuristin on integroitu lampun kantaan, kuva 3.8. Lamppu on varustettu E-kierrekannalla ja on tarkoitettu toimimaan kanta alaspäin asennossa. Integroitu liitälaitte tarjoaa mahdollisuuden korvata valaisimessa oleva hehkulamppu tällä lampulla. Johtuen integroidun liitälaitteen huonosta lämpötasapainosta lamppu ei kuitenkaan esiinny vielä markkinoilla [7].



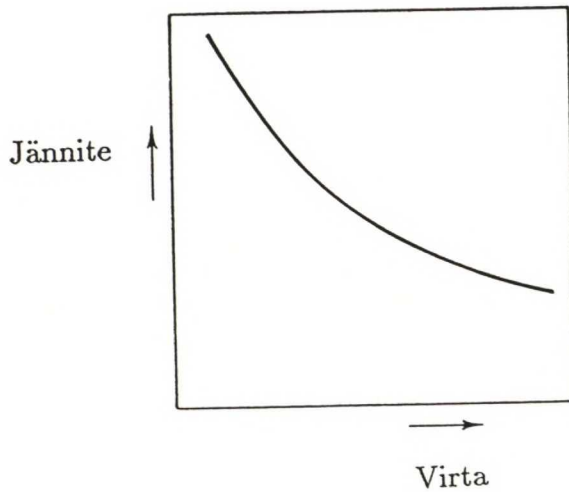
Kuva 3.8 50 W monimetallilamppu, jossa kuristin on integroitu lampun kantaan.

Viimeisin uutuus monimetallilamppujen historiassa on autonvalokäyttöön kehitetty 35 W monimetallilamppu. Lampun pieni koko mahdollistaa autonvaloheittimien koon pienenemisen. Lamppu tarvitsee liitäntälaitteiksi kuristimen ja sytyttimen, joiden ei tarvitse olla itse valonheittimessä. Lampulle on kehitetty elektroninen sytytyslaite, jonka avulla lamppu saavuttaa täyden valovirtansa noin sekunnin kuluessa syttymisestä. Lampun värielämpötila on noin 4000 K. Valotehokkuus on korkeampi kuin autovalonlähteenä käytetyn H4-halogeenilampun. Autovalokäyttöön tarkoitetun monimetallilampun elinikä on noin 1 500 tuntia, mikä on 5 - 10-kertainen H4-lamppuun verrattuna. Lampun kehitystyö jatkuu toistaiseksi [35].

3.1.8 Liitäntälaitteet

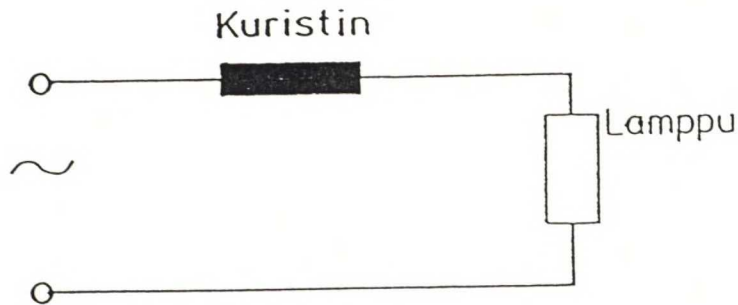
3.1.8.1 Kuristin

Purkauslampun sähköpurkaukselle on ominaista negatiivinen jännite-virtakäyrä, kuva 3.9 [29]. Sähköpurkauksen virran kasvaessa pienenee vaadittava jännite elektrodien välillä. Ilman virran rajoitusta purkauksen virran kasvu johtaa lopulta oikosulkuun elektrodien välillä.



Kuva 3.9 Kaasupurkauksen virta/jännite-ominaiskäyrä.

Monimetallilampun virranrajoitukseen käytetään tavallisimmin lampun kanssa sarjaan kytkettyä induktiivista kuristinta, kuva 3.10.



Kuva 3.10 Monimetallilampun ja kuristimen sarjakytkentä.

Monimetallilampun lampputeho määräytyy lamppuvirran, verkkojännitteen sekä kuristimen impedanssin perusteella. Kuristimen avulla on lampputeho pyrittävä pitämään mahdollisimman lähellä nimellisarvoaan. Lampputehon muutokset aiheuttavat muutoksia purkausputken lämpötilassa ja höyrynpaineessa. Tämä merkitsee muutoksia valovirrassa ja valon väriominaisuuksissa. Liian suuri teho lisää purkausputken seinämän tehokuormitusta ja lyhentää siten lampun elinikää.

Kuristimessa on yleensä ulosottoja erilaisille verkkojännitteille, jotta voidaan ottaa huomioon asennuspaikan jännitetaso. Yleisimmät ulosotot ovat 220/230

V verkkojännitteen tehollisarvon nimellisarvon ollessa 220 V. Verkkojännitteen noustessa arvoon 230 V käytetään ulosottoina vastaavasti 230/240 V.

Monimetallilamppujen kuristimia ei ole vielä kansainvälisesti standardoitu. Kuristimet valmistetaan toistaiseksi lamppuvalmistajien vaatimusten mukaan. Monimetallilamppuja koskeva IEC-standardi on parhaillaan valmisteilla. Tässä standardissa tullaan esittämään arvot monimetallilamppujen referenssikuristimille. Monimetallilamppuja koskevan lamppustandardin laatiminen vie kuitenkin aikaa, sillä eri lampputyyppejä on useita ja kehitystä lamppualalla tapahtuu jatkuvasti. Lisäksi eri valmistajien samanlaisten lampputyyppeiden liitälaitteiden kesken esiintyy epäyhtenäisyyttä. Esimerkkinä mainittakoon kahden eri valmistajan kierrekantainen, samantehoinen monimetallilamppu, joista toisen valmistajan lamputille käytetään tällä hetkellä referenssikuristimena vastaavantehoisen suurpainenatriumlampun referenssikuristinta ja toisen valmistajan lamputille vastaavantehoisen elohopealampun referenssikuristinta.

3.1.8.2 Elektroninen liitälaitte

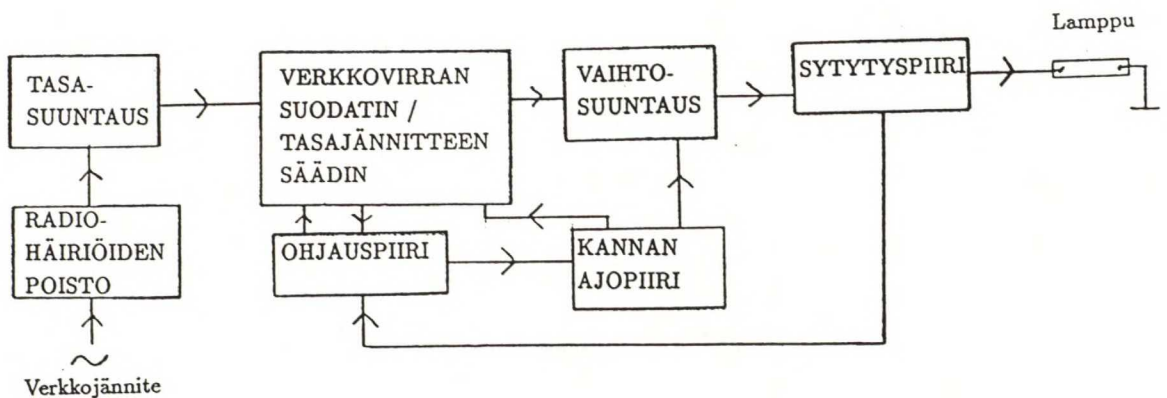
Konventionaalisen kuristimen sijasta voidaan monimetallilamppu varustaa elektronisella liitälaitteella, jolloin lamppu toimii verkkotaajuutta korkeammalla toimintataajuudella. Monimetallilampun elektronisen liitälaitteen toteutus on vielä pitkälti tutkimusasteella. Erityisesti on tutkittu pienitehoisten lamppujen (70 W, 150 W) suurtaajuuskäyttöä.

Kaasupurkauslamppujen suurtaajuuskäytöllä on liitälaitteen koon ja painon pientymisen lisäksi useita muita etuja. Näitä ovat parempi valon laatu ilman välkyntää, pienemmät liitälaittehäviöt ja parempi valotehokkuus. Suurtaajuuskäytössä ei esiinny purkauskaaren taipumista. Lisäksi valovirran alenema on pienempi johtuen elektrodimateriaalin aiheuttaman purkausputken tummumisen vähenemisestä. Myös värilämpötilan muutokset ovat pieniä lampun eliniän aikana. Lisäksi kuumen purkausputken välitön jälleensyttyminen on helppo toteuttaa elektronisen liitälaitteen avulla.

Lukuisista hyvistä ominaisuuksista riippumatta on monimetallilampun elektronisen liitälaitteen kehitys ollut hidasta. Tämä johtuu monimetallilampun erilaisesta käyttäytymisestä korkeammilla taajuuksilla. Tietyillä toimintataajuuksilla korkeapaineisen kaasupurkauksen purkausputkeen syntyy seisovia akustisia aaltoja. Tämä akustinen resonanssi aiheuttaa purkauskaaren

epästabiilisuutta. Epästabiilisuudesta johtuen lampun valotekniset ominaisuudet muuttuvat, mikä näkyy lampun valovirran alenemana sekä värilämpötilan muutoksina. Lisäksi resonanssitaajuuksilla lamppujännite kasvaa. Kullakin lampulla on useita resonanssitaajuuksia, joiden suuruus riippuu purkausputken koosta ja muodosta sekä täytöksestä. Erityisesti monimetallilampulla on useita resonanssitaajuuksia johtuen useista erilaisista yhdisteistä purkausputkessa. Suurtaajuuskäytössä kunkin lampun toimintataajuus on löydettävä sellaiselta alueelta, jossa ei esiinny resonanssitaajuuksia [40].

Kuvassa 3.11 on esitetty erään 70 W kaksikantaisille monimetallilampuille suunnitellun elektronisen liitälaitteen periaatteellinen toiminta. Liitälaitteen toimintataajuudeksi on valittu 22.5 kHz. Toimintataajuus on valittu taajuusalueelta 20 ... 25 kHz, jolla alueella tällä lampulla ei esiinny resonanssitaajuuksia. Liitälaitte kytketään verkkoon radiohäiriöitä poistavan piirin avulla. Verkkovirran suodattimen avulla liitälaitteen ottama verkkovirta pidetään sinimuotoisena. Tasasuuntaajassa verkon vaihtojännite muunnetaan tasajännitteeksi, jota ohjataan tasajännitteen säätöpiirin avulla. Tasajännite ohjataan vaihtosuuntaajaan, jonka ulostulosta saadaan suurtaajuinen vaihtojännite. Kannan ajopiirin avulla ohjataan vaihtosuuntaajan transistoreita. Sytytyspiirin kondensaattorien ja kuristimen muodostaman resonanssiapiirin avulla synnytetään lampun elektrodien välille 3 kV jännite, jonka avulla lamppu syttyy. Sytytyspiiristä on takaisinkytkentä liitälaitteen ohjauspiiriin, joka ohjaa piirin toimintaa [41].

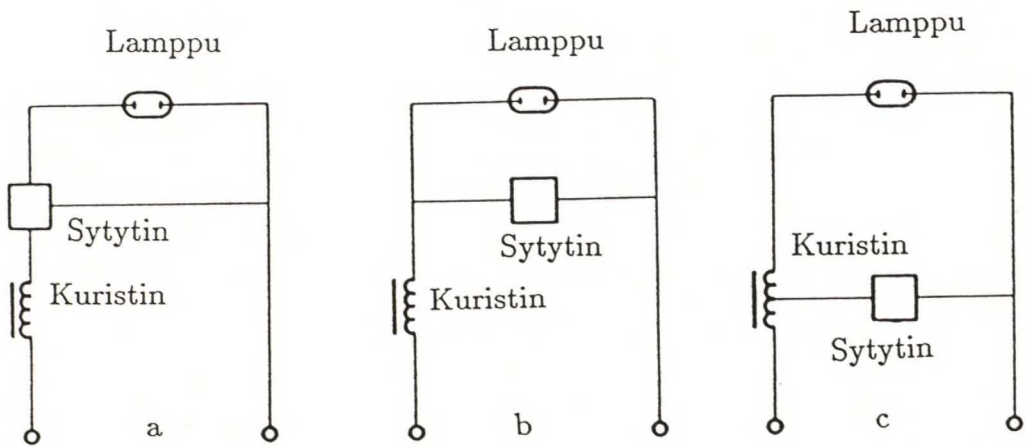


Kuva 3.11 70 W kaksikantaiselle monimetallilampulle suunnitellun elektronisen liitälaitteen periaatteellinen toimintakaavio.

3.1.8.3 Sytytyslaitteet

Sytytyslaitteen avulla synnytetään lampun elektrodien välille niin suuri sähkökenttä, että saadaan syntymään läpilyönti purkausputken kaasussa. Tarvittava sytytysjännite on monimetallilampuille lampputyypistä ja tehosta riippuen n. 1 - 5 kV. Sytytyslaitteen synnyttämät korkea-amplitudiset sytytyspulssit summautuvat verkkojännitteeseen. Yhdellä verkkojännitteen puolijaksolla esiintyvä sytytyspulssien lukumäärä vaihtelee sytytyslaitetyypistä riippuen yhdestä pulssista useampaan pulssiin.

Monimetallilampujen yleisimmät sytytyslaitekytkennät on esitetty kuvissa 3.12 a,b,c.



Kuva 3.12 Monimetallilampun sytytyslaitekytkentöjä:

a=sytytyslaitteen sytytysmuuntaja sarjassa kuristimen ja lampun välisessä johdossa

b=lampun rinnalle kytketty sytytyslaite

c=kuristimen ulosottoon kytketty sytytyslaite.

Kuvassa 3.12 a on suurtaajuussytytinlaite, jonka sytytysmuuntaja on sarjassa kuristimen ja lampun välisessä johdossa. Sytytysjännite rajoittuu sytytyslaitteen ja lampun väliseen johtimeen. Sytytyspulssien suuren taajuuden johdosta sytytysjännite vaimenee nopeasti kuormituskapasitanssin kasvaessa. Kuormituskapasitanssi voi olla noin 100 pF, jolloin sytytyslaitteen ja lampun välisen johdon pituus voi olla vain noin metri johdon kapasitanssin ollessa 100 pF/m. Sytytyslaite on tavallisimmin asennettu valaisimeen.

Kuvassa 3.12 b sytytyslaite on kytketty lampun rinnalle. Tässä kytkennässä liitälaitteena oleva kuristin altistuu sytytysjännitteelle, jolloin kuristimen eristysten tulee olla riittävät. Sytytyslaitteen kuormituskapasitanssi voi olla noin 1000 pF. Kun kuristimen ja lampun välisen johdon kapasitanssi on 100 pF/m, saa tämän johdon pituus olla noin 10 m. Sytytyslaite voidaan asentaa joko kuristimen tai lampun läheisyyteen.

Kuvan 3.12 c kytkentä vaatii kuristimen, jossa on erillinen ulosotto sytytyslaitetta varten. Sytytyslaite on kytketty kuristimen ulosottoon kuristimen toimissa samalla sytytysmuuntajana. Kuristimen ja lampun välisen johdon samoin kuin kuristimen eristyksien on oltava riittäviä, jotta ne kestävät korkean sytytysjännitteen. Sytytyslaitteen kuormituskapasitanssi ja siten myös kuristimen ja lampun välisen johdon pituus on samaa suuruusluokkaa kuin edellisessä kytkennässä.

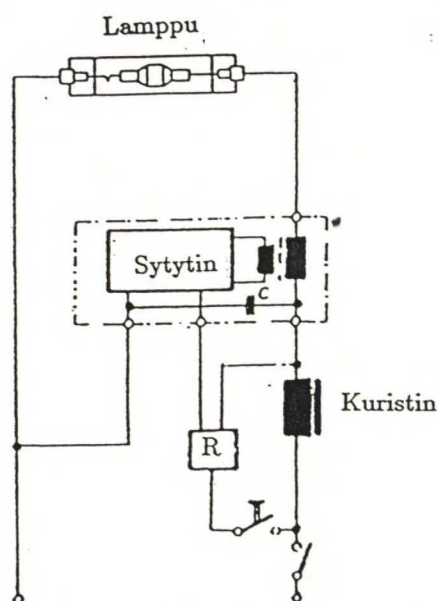
Sytytyslaitteiden aktiivisina osina voidaan käyttää bimetallikytkintä, kaasupurkauskytkinelementtiä tai laite voi olla täysin elektroninen, jolloin toiminta perustuu puolijohdekytkimeen. Suuntaus on kohti täyselektronisia laitteita. Elektronisten laitteiden etuja em. muihin vaihtoehtoihin verrattuna ovat pitkäikäisyys ja toimintavarmuus, mutta elektronisten laitteiden hinnat ovat korkeampia vaihtoehtoihin sytytyslaitteisiin verrattuna. Kaasupurkauskytkinelementti on kytkimenä toimiva kipinäväli, jossa kaksi elektrodia on sijoitettu lähekkäin. Kytkentätapahtuma perustuu kipinävälin kaasussa tapahtuvaan lämpilyöntiin.

Sytytinlaitteessa, jossa aktiivisena osana on kaasupurkauskytkinelementti tai puolijohdekytkin, sytytysjännite syntyy kondensaattoriin varautuneen energian purkautuessa. Kytkimen sulkeutuessa kondensaattoriin varautunut energia purkautuu sytytysmuuntajan tai liitälaitteena olevan muuntajan (sytytyslaite kuristimen ulosotossa, kuvan 3.12 c kytkentä) käämitykseen, jolloin käämityksen toisioon syntyy lampulle menevä korkea sytytysjännite. Sytytyslaitteessa, jossa aktiivisena osana on bimetallikytkin, katkoo tämä kytkin liitälaitteena olevan kuristimen virtaa. Bimetallikytkimen avautuessa äkillinen virran muutos kuristimessa aiheuttaa jännitesykäyksen purkausputken elektrodien välille.

Edellä käsitellyt sytytyslaitteet soveltuvat normaaliin kylmien lamppujen sytyttämiseen. Kun lamppu esimerkiksi verkkojännitekatkoksen seurauksena sammuu, ei sen jälleensyttyminen em. sytytyslaitteilla ole heti mahdollista purkausputken korkeasta höyrynpaineesta johtuen. Syttyminen näillä sytytyslaitteilla

on mahdollista vasta kun lämpötila ja siten höyrynpaine purkausputkessa on laskenut.

Pikasytytyslaitteen avulla synnytetty useiden kymmenien kilovolttien sytytysjännite sen sijaan takaa myös kuumen lampun välittömän jälleensyttymisen. Pikasytytyslaitteet soveltuvat ainostaan kaksikantaisille monimetallilampuille, sillä tavallisten kierrekantaisten monimetallilamppujen rakenne ei kestä näin suuria sytytysjännitteitä. Pikasytytyslaitteeksi soveltuu kuvan 3.12 a kytkennän mukainen sytytyspiiri, koska tässä piirissä sytytysjännite rajoittuu sytytyslaitteen ja lampun väliseen johtoon. Sytytyslaite synnyttää useita sytytyspulsseja verkkojännitteen puolijaksoa kohti. Pulssien amplitudin huippuarvo on 20 - 70 kV sytytyslaitteesta riippuen. Syttymisaika rajoittuu yleensä muutamaksi sekuntiin. Syttymisen mahdollista epäonnistumista varten sytyttimien on säilyttävä toimintavalmiina määrätyn minimisyttymisaajan verran. Sytyttimen komponentit suunnitellaan taloudellisista syistä lyhyille syttymisajoille. Syttymisen epäonnistumista varten erityisesti lampun eliniän loppuilla on kytkentään lisätty rele, joka rajoittaa syttymisaajan hiukan minimisyttymisaikaa suuremmaksi. Pikasytytyslaitteen kytkentä on esitetty kuvassa 3.13 [30, 37].



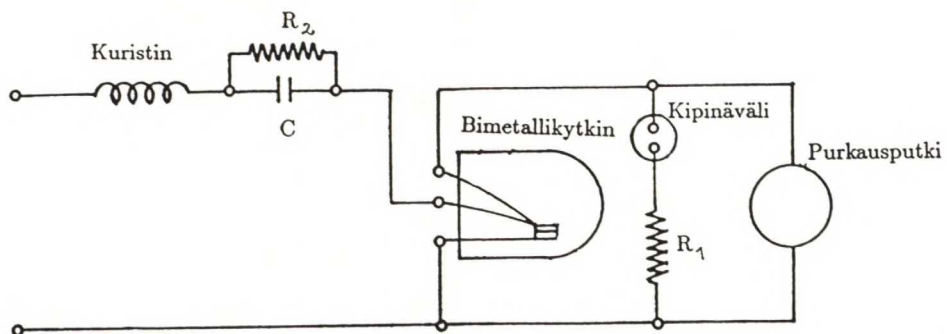
Kuva 3.13 Kaksikantaisille monimetallilampuille soveltuva pikasytytyslaite. Kytkennässä oleva rele (R) rajoittaa syttymisaajan hiukan minimisyttymisaikaa suuremmaksi.

Monimetallilamppujen sytyttimien yhteydessä on muistettava, että eri lampputyypeille soveltuvat vain tietyt sytytyslaitetyypit. Eri lamppuvalmistajien samantehoiset lamput eivät välttämättä syty samoilla sytytyslaitteilla.

3.1.8.4 Ilman ulkoista sytytintä toimivat lamput

Monimetallilampuissa on myös muutamia lampputyyppejä, jotka syttyvät ilman ulkoista sytytintä. Näissä lampuissa sytytinosa on sijoitettu lampun ulkokuvun sisäpuolelle. Eräs tällainen sytytinlaiteratkaisu koostuu ulkokuvun sisällä olevasta purkausputken rinnalle kytketystä bimetallikytkimestä sekä tämän rinnalla olevasta kipinävälin ja vastuksen (R_1) sarjakytkenästä, kuva 3.14. Lampun liitälaitteena käytetyn kuristimen kanssa on sarjaan kytketty kondensaattorin (C) ja vastuksen (R_2) rinnankytkentä.

Kun piiriin kytketään verkkojännite, virta kulkee aluksi kuristimen, kondensaattorin ja bimetallikytkimen kautta. Virran kulku bimetallikytkimen kautta aiheuttaa bimetallililiuskojen lämpenemisen. Riittävästi lämmentyään bimetallikytkin avautuu. Avautumishetkellä äkillinen virran muuttuminen kuristimessa aiheuttaa jännitesykäyksen lampun elektrodien välille. Mikäli jännite on riittävä, lamppu syttyy. Jos purkaus elektrodien välillä ei jatku bimetallikytkimen avauduttua, ei bimetallililiuskojen läpi kulje virtaa, jolloin ne jäähtyttyään sulkeutuvat uudelleen. Bimetallililiuskojen lämmentyään ne avautuvat. Bimetallikytkimen avautuminen ja tästä aiheutuva kuristimen jännitesykäyksen syntyminen toistuvat kunnes lamppu syttyy. Kun purkaus lampun elektrodien välillä on syttynyt, purkautuu kondensaattoriin varautunut energia lampun kautta, mikä helpottaa purkauksen siirtymistä hohtopurkauksesta kaaripurkaukseksi. Purkausputken rinnalla olevan kipinävälin tehtävänä on estää liian suurten jännitesykäysten siirtyminen lampulle. Kipinävälin kanssa sarjassa oleva vastuksen tehtävänä on rajoittaa kipinävälin virtaa [42].



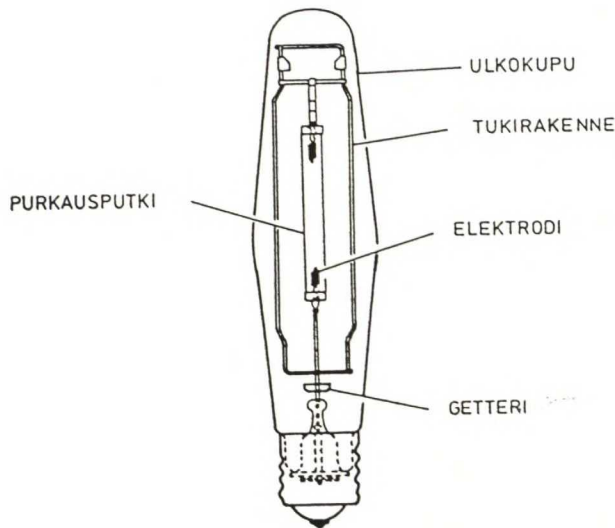
Kuva 3.14 Bimetallikytkimellä ja tämän rinnalla olevan kipinävälin ja vastuksen sarjakytkenällä varustettu, ilman ulkoista sytytintä toimiva monimetallilamppu.

3.2 Suurpainenatriumlamput

3.2.1 Yleistä

Värikorjatun suurpainenatriumlampun parannettu värintoisto tavalliseen suurpainenatriumlamppuun nähden perustuu purkausputkessa vallitsevaan korotettuun natriumin höyrynpaineeseen. Lamppujen rakenne on samanlainen muutamia poikkeuksia lukuunottamatta. Purkausputken lämpötilaa ja höyrynpainetta saadaan korotettua purkausputken mittasuhteita muuttamalla. Myös purkausputken päissä olevien lämpöheijastimien avulla saadaan korotettua natriumin höyrynpainetta purkausputkessa.

Kuvassa 3.15 on esitetty tyypillinen suurpainenatriumlampun rakenne. Valoa tuottava kaasupurkaus tapahtuu purkausputkessa. Purkausputken sisäänmenojohdot on yhdistetty läpivientien avulla elektrodeihin. Purkausputkea pitää paikallaan tukikehikko. Ulkokuvun sisällä olevat getterirenkaat pitävät lampun sisätilan vapaana epäpuhtauksista. Purkausputki on sijoitettu ulkokuvun sisään.



Kuva 3.15 Suurpainenatriumlampun rakenne.

Lampun rakennetta ja käytettyjen materiaalien ominaisuuksia käydään tarkemmin läpi seuraavassa.

3.2.2 Purkausputki

Suurpainenatriumlampun kaasupurkauksen korkeasta lämpötilasta johtuen purkausputken materiaalin tulee täyttää useita vaatimuksia purkausputkille normaalisti asetettavien vaatimusten lisäksi. Purkausputkella tulee olla seuraavat ominaisuudet

- hyvä valon läpäisykyky
- kaasutiiviys
- hyvä vastustuskyky natriumhöyryn reagoitua vastaan höyrynpainealueella 5 - 100 kPa ja lämpötila-alueella 1000-2000 K
- sähköinen resistiivisyys
- alhainen haihtumisaste korkeissa lämpötiloissa
- mekaaninen kestävyys
- sopeutuminen lämpötilaeroihin lamppua sammutettaessa ja sytytettäessä

Monikiteinen sintrattu alumiinioksidi (Al_2O_3) täyttää nämä vaatimukset. Sen valon läpäisykykyä voidaan parantaa alumiinioksidin tiheyttä kasvattamalla sintrauksen avulla sekä lisäämällä alumiinioksidiin hiukan magnesiumoksidia.

Alumiinioksidin huokoisuudesta johtuen siihen tulevat valonsäteet siroavat useaan suuntaan. Purkausputki on läpikuultava. Purkausputken läpäisykyky säteilyn aallonpituusalueella 200 - 6000 nm on 90 - 95 % riippuen mm. materiaalin valmistusmenetelmästä sekä lämpötilasta.

Alumiinioksidista valmistetun purkausputken seinämän suurin tehokuormitus saa olla noin $20\text{--}22 \text{ W/cm}^2$. Tätä suuremmilla rasituksilla lampun elinikä lyhenee johtuen mm. alumiinin sublimoitumisesta seinämän lämpötilan noustessa.

Vaihtoehtoinen purkausputkimateriaali on safiiri, joka on yksikiteistä alumiinioksidia. Safiirin etuja monikiteiseen alumiinioksidiin nähden ovat parempi vastustuskyky natriumhöyryn reagoitua vastaan sekä korkeampien lämpötilojen kestävyys. Safiiri on läpinäkyvä. Sen läpäisykyky näkyvälle valolle on hiukan suurempi kuin monikiteisen alumiinioksidin. Lampun valotehokkuutta voidaan parantaa nostamalla purkausputken seinämän tehokuormitusta. Safiirista valmistetun purkausputken seinämän tehokuormitus saa olla noin 30-32

W/cm^2 . Käyttämällä purkausputkimateriaalina safiria saadaan lampun valotehokkuus noin 5 % suuremmaksi monikiteisen alumiinioksidin käyttöön verrattuna.

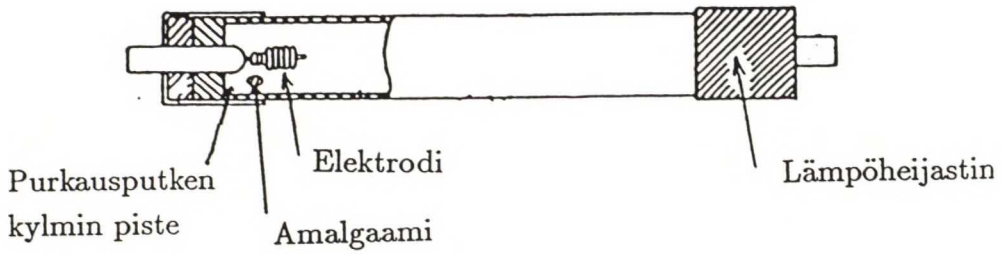
Purkausputken luotettavien läpivientien vaikea toteuttaminen sekä safirin korkea hinta ovat rajoittaneet safirin käyttöä purkausputkimateriaalina. Monikiteinen sintrattu alumiinioksidi on toistaiseksi käytetyin purkausputkimateriaali [30].

Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen purkausputki poikkeaa hieman tavallisen suurpainenatriumlampun purkausputkesta. Parannettu värintoisto saavutetaan purkausputken höyrynpainetta kasvattamalla. Höyrynpaineen vaikutusta purkauksen ominaisuuksiin on käsitelty luvussa 4.5.1.

Lampun palaessa on osa purkausputkessa olevasta natriumista ja elohopeasta nestemäisenä amalgaamiseoksena purkausputken kylmimmän pisteen lähellä. Lampun kylmäpiste sijaitsee purkausputken toisessa päässä lähellä virtaläpivientiiä. Lampun kylmäpisteen lämpötilan noustessa kasvaa natriumin höyrynpaine. Tavallisissa suurpainenatriumlampuissa natriumin höyrynpaine purkausputkessa on luokkaa 10 - 15 kPa. Värikorjatuilla lampuilla natriumin höyrynpaine on välillä 30 - 65 kPa.

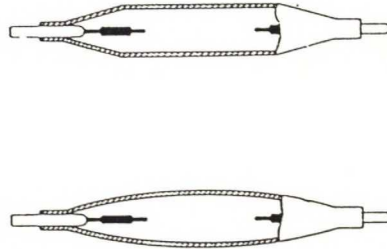
Elektrodien kärjen ja purkausputken pään välisen etäisyyden lyheneminen merkitsee korkeampaa lämpötilaa elektrodien lähellä. Tällöin kylmäpisteen lämpötilan noustessa höyrynpaine purkausputkessa kasvaa [30].

Kylmäpisteen lämpötilaa saadaan myös nostettua sijoittamalla purkausputken ulkopuolelle putken päihin tantaalista tai niobiumista valmistetut lämpöheijastimet, kuva 3.16. Lämpöheijastimien käytöllä vältetään purkausputken seinämien yllirasittumiselta ja purkausputken seinämän suurin lämpötila jää alle 1200°C [43, 44].



Kuva 3.16 Värikorjatun suurpainenatriumlampun lämpöheijastimilla varustettu purkausputki.

Kuvassa 3.17 on esitetty yksi ratkaisu, jossa purkausputken päiden muotoilulla saadaan vähennettyä lämpöhäviöitä putken päissä. Kylmäpisteen lämpötila nousee ilman, että purkausputken keskiosassa olevan seinämän kuumimman pisteen lämpötila nousee [45].



Kuva 3.17 Värikorjatun suurpainenatriumlampun muotoiltu purkausputki.

Suurpainenatriumlamppu ei ole yhtä herkkä purkausputken lämpötasapainolle kuin monimetallilamppu. Suurpainenatriumlampulla polttoasennon muutokset eivät vaikuta kylmäpisteen lämpötilaan ja sitä kautta lampun valoteknisiin ominaisuuksiin. Tästä johtuen lampun polttoasento on vapaa.

3.2.3 Purkausputken täytös

Purkausputken täytös käsittää natriumia, elohopeaa ja jalokaasua.

Pääasiallinen valoa tuottava aine on natrium. Elohopea toimii purkauksessa ns. puskurikaasuna. Se nostaa natriumpurkauksen jännitegradienttia. Tällöin lampputeho saadaan riittävän suureksi ilman purkausvälin tai lamppuvirran kasvattamista.

Valmistuksen yhteydessä natrium ja elohopea viedään purkausputkeen nestemäisenä amalgaamiseoksena. Natriumin mooliosuus amalgaamissa on tavallisesti noin 75 - 78 %, mikä paino-osuutena amalgaamista on 25 - 29 %. Värikorjatuissa lampuissa käytetään tavallisesti amalgaamia, jossa natriumin osuus alkuperäisessä amalgaamin koostumuksessa on suurempi kuin tavallisilla suurpainenatriumlampuilla. Tämä johtuu korkeamman natriumin höyrynpaineen aiheuttamasta suuremmasta purkausputken natriumhävikistä, josta enemmän luvussa 4.5.5.

Jalokaasua käytetään syttymistä avustavana kaasuna läpilyönnin tapahtuessa jalokaasussa. Tavallisimmin käytetty jalokaasu on ksenon. Ksenon estää elektrodimateriaalin kulumista syttymisvaiheen aikana hidastaen siten purkausputken päiden tummumista. Tämä pidentää lampun elinikää. Ksenonin paineen noustessa täytöskaasun lämmönjohtokyky alenee. Tällöin lämmön johtuminen plasmasta vähenee ja lampun valovirta kasvaa lampputehon pysyessä vakiona. Ksenonin paineen nousu nostaa kuitenkin lampun syttymisjännitettä.

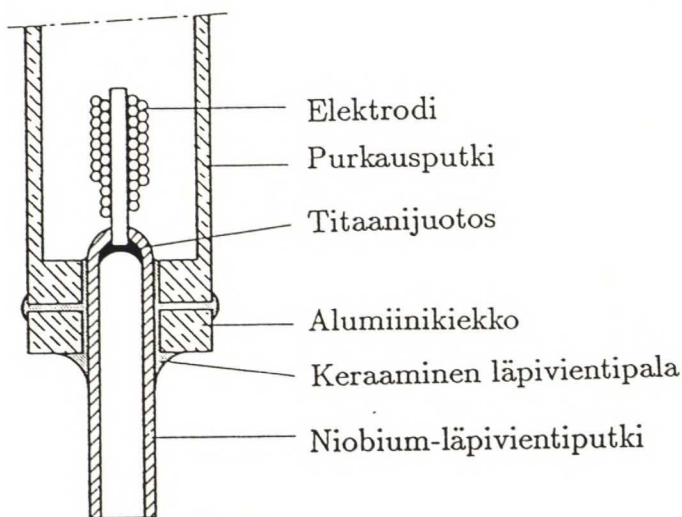
Jalokaasuna voidaan käyttää myös neonin ja argonin seosta (ns. Penningseos), jossa neonin osuus on noin 99.5 % ja argonin osuus noin 0.5 %. Tällöin lampun syttymisjännite alenee, eikä tarvita ulkoista sytytintä. Neon-argon kaasuseoksen korkeammasta lämmönjohtokyvystä johtuen lamppujännite nousee syttymisvaiheessa nopeammin ksenonin käyttöön verrattuna [30].

3.2.4 Purkausputken virtaläpiviennit ja elektrodit

Koska alumiinioksidilla on jyrkkä sulamiskohta, ts. sen pehmenemis- ja sulamispisteet ovat lähes samat, ei purkausputken päitä voida sulkea puristamalla. Purkausputken sulkeminen tapahtuu keraamisten juotosaineiden avulla. Juotosaineiden avulla kiinnitetyt läpivientijohtimet toimivat sähkövirran kulkutienä sekä elektrodien kannattimina. Läpivientiliitoksen tulee kestää kuuman natriumhöyryn vaikutukset sekä pysyä tiiviinä ja murtumattomana purkausputken lämpötilamuutoksista huolimatta.

Läpivientijohtimien materiaalina käytetään niobiumia, johon on lisätty 1 % zirkoniumia. Niobiumin laajenemiskerroin on lähempänä sintratun alumiinioksidin kuin elektrodimateriaalina käytetyn volframin laajenemiskerrointa. Niobium ei reagoi helposti natriumin kanssa korkeissakaan lämpötiloissa. Lisäksi niobium läpäisee suhteellisen hyvin purkausputkeen valmistuksen yhteydessä päässyttä vetyä, joka siten getterin vaikutuksesta imeytyy pois purkausputkesta. Purkausputkessa oleva vety on aina haitallista, koska se nostaa lamppujännitettä ja lyhentää siten lampun elinikää.

Kuvassa 3.18 on esitetty purkausputken läpivienti. Niobium-läpiviennit ovat putken muotoisia. Purkausputken päissä on keraamiset alumiinikiekot.



Kuva 3.18 Suurpainenatriumlampun purkausputken läpivienti.

Elektrodit on kiinnitetty läpivientiputkiin titaanijuotoksella. Elektrodimateriaalina käytetään volframia. Elektrodit muodostuvat volframitapin ympärille kahdeksi kerrokseksi kierretyistä volframilangoista.

Volframilankojen väliin on sijoitettu metallioksidoista (BaO , CaO , WO_3) koostuvaa emissioainetta. Emissioaineen tehtävänä on alentaa elektrodien työfunktia eli energiaa, jolla elektronit irtoavat elektrodeilta. Emissioaine nopeuttaa syttymistapahtumaa, jolloin elektrodimateriaalin kulumisen syttymisen aikana vähenee. Lampun palamisen aikana emissioaine pienentää elektrodien toimintalämpötilaa, jolloin elektrodihäviöt pienenevät sekä elektrodien höyrystymisestä johtuva purkausputken seinien tummuminen vähenee [30, 46].

3.2.5 Getteri

Ulkokuvun ja purkausputken välissä vallisevaa tyhjöä pidetään yllä kaasuja absorboivan getterin avulla. Getterin tehtävänä on imeä lampun metalliosista liukenevia ja valmistusvaiheessa ulkokuvun sisäpuolelle päässeitä epäpuhtauksia. Getteri suojaa myös lampun metalliosia korroosiolta.

Lampun alapäässä kannan lähellä sijaitsevat getterirenkaat ovat bariumia. Lampun valmistusvaiheen lopussa renkaissa oleva barium höyrystyy korkeassa lämpötilassa ja höyrystynyt barium kulkeutuu ulkokuvun sisäpintaan kannan lähelle. Höyrystynyt barium muodostaa ulkokuvun sisäpintaan tumman kerroksen, joka toimii getterinä imien epäpuhtauksia [30].

3.2.6 Ulkokupu

Ulkokuvun tehtävänä on toimia purkausputken lämpösuojana sekä suojata purkausputkea hapettumiselta. Ulkokuvun sisäpuolella vallitseva tyhjö mahdollistaa purkausputken riittävän lämpenemisen.

Ulkokupu on sylinterin tai ellipsoidin muotoinen. Ulkokuvun materiaalina käytetään kovalasia.

3.2.7 Lampputyypit

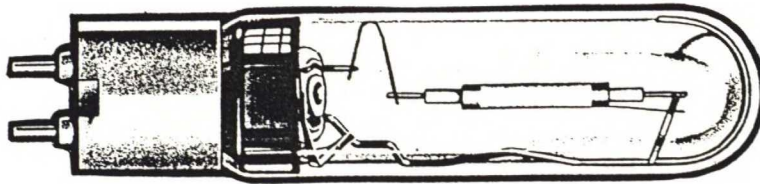
3.2.7.1 Kierrekantalamput

Kierrekantaisten värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen tehoalue on 150 - 400 W. Lamppujen värintoistoindeksi $R_a = 60 - 65$ ja värilämpötila on noin 2150 - 2200 K [34, 35, 36].

Lamppujen ulkokupu on sylinterin tai ellipsoidin muotoinen. Ellipsoidin muotoinen ulkokupu päällystetään usein sisäpuolelta valoa hajoittavalla jauheella lampun luminanssin pienentämiseksi. Tämä alentaa hieman lampun valovirtaa ja siten valotehokkuutta. Lamppujen kanta on E40.

3.2.7.2 Erikoiskantalamput

Kannalla PG 12 varustettujen värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen tehoalue on 35 - 100 W, kuva 3.19. Näiden lamppujen värintoistoindeksi $R_a > 80$ ja värilämpötila 2500 K [35].

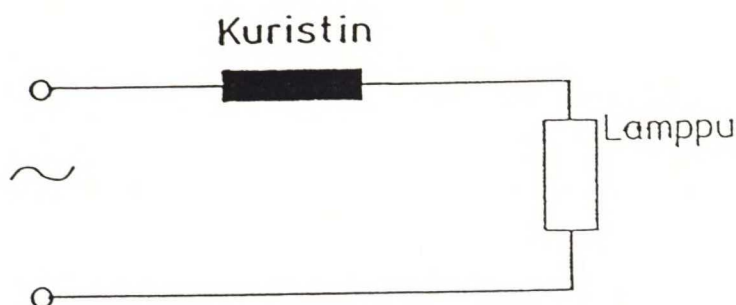


Kuva 3.19 PG 12 - kantainen 50 W värikorjattu suurpainenatriumlamppu.

3.2.8 Liitälaitteet

3.2.8.1 Kuristin

Kaasupurkauksen negatiivisesta jännite-virta-ominaiskäyrästä (ks. luku 3.1.8.1) johtuen on purkauslampun virtaa rajoitettava. Suurpainenatriumlampun virranrajoitukseen käytetään tavallisimmin lampun kanssa sarjaan kytkettävää induktiivista kuristinta, kuva 3.20.



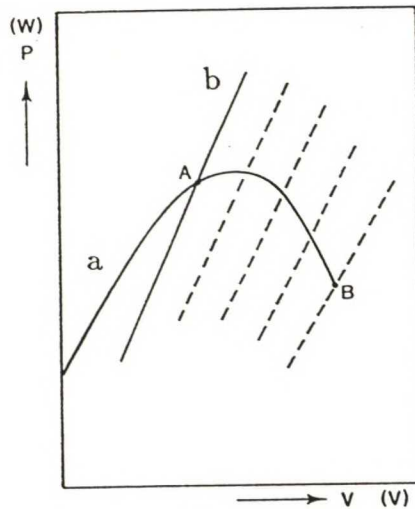
Kuva 3.20 Suurpainenatriumlampun ja kuristimen sarjakytkeä.

Suurpainenatriumlampun toiminnan kannalta tärkeä suure on lampun palamisjännite, jonka käyttäytymiseen vaikuttaa ensinnäkin purkausputkessa oleva höyrystymätön amalgaami. Amalgaamista johtuen lampputehomuutokset aiheuttavat muutoksia lampun kylmäpisteen lämpötilassa ja siten natriumin ja elohopean höyrynpaineissa. Höyrynpaineiden muutokset näkyvät muutoksina lamppujännitteessä. Toinen suurpainenatriumlampulle ominainen piirre on lamppujännitteen nousu lampun polttoian myötä. Tähän ovat syynä muutokset purkausputkessa olevan amalgaamin lämpötilassa ja koostumuksessa. Amalgaamin lämpötilan ja koostumuksen vaikutusta lamppujännitteeseen on käsitelty tarkemmin luvussa 4.5.5.

Lamppuvirta puolestaan riippuu pääasiassa lampun kanssa sarjassa olevasta liitälaitteesta ja sen ominaisuuksista. Lamppujännitteen muutokset asettavat korkeita vaatimuksia liitälaitteen ja lampun yhteistoiminnalle, jotta lampputeho säilyisi mahdollisimman muuttumattomana. Liitälaitteen tehtävänä on pyrkiä pitämään lampputeho mahdollisimman lähellä nimellisarvoaan

verkkojännitevaihteluista ja lamppujännitteen muutoksista huolimatta. Liitäntälaitteen ja lampun ominaisuuksia voidaan tarkastella kuristimen ja lampun ominaiskäyrien avulla.

Kuristimen ominaiskäyrä kuvaa lampputehon, P , ja lamppujännitteen, V , suhdetta syöttöjännitteen ollessa vakio, kuva 3.21 käyrä a. Lampun ominaiskäyrä kuvaa esimerkiksi syöttöjännitteen vaihteluiden aiheuttamien lampputehomuutoksien vaikutusta lamppujännitteeseen, kuva 3.21 käyrä b. Lampun toimintapiste määräytyy kuristimen ja lampun ominaiskäyrien leikkauspisteen perusteella. Kuvassa 3.22 piste A on uuden lampun toimintapiste. Koska lamppujännite kasvaa lampun polttoian myötä, siirtyy lampun ominaiskäyrä kohti korkeampaa jännitettä eliniän aikana. Näitä siirtymiä kuvaavat epäyhtenäiset viivat kuvassa. Lampun polttoian myötä tapahtuvan lamppujännitteen kasvun seurauksena siirtyy lampun toimintapiste kuristimen ominaiskäyrän ja lampun uuden ominaiskäyrän leikkauspisteeseen. Kun toimintapiste on siirtynyt pisteeseen B (drop-out -piste), ei kuristin enää jaksakaan pitää lamppua toiminnassa ja lamppu sammuu [30]. Suurpainenaatriumlampun toimintarajat saadaan määritettyä kuristimen ja lampun ominaiskäyriin perustuvan nelikulmiodiagrammin avulla, luku 3.2.8.1.1.



Kuva 3.21 Kuristimen (a) ja lampun (b) ominaiskäyrät.

Piste A on uuden lampun toimintapiste. Polttoian aikana tapahtuvan lamppujännitteen kasvun myötä toimintapiste siirtyy kohti pistettä B.

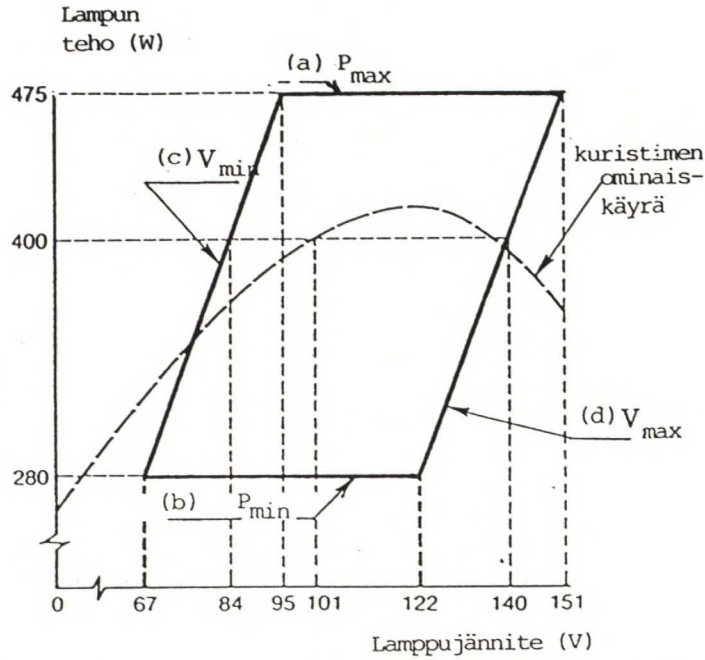
Suurpainenaatriumlamppuja koskevassa lamppustandardissa IEC 662 (High pressure sodium vapour lamps 1980) on määritelty referenssikuristimen arvot

250 ja 400 W suurpainenatriumlampuille [47]. Lisäjulkaisussa em. standardiin (Amendment No. 1 1986) on määritelty 150 W suurpainenatriumlampun referenssikuristin. Lisäksi toisessa lisäjulkaisussa standardiin IEC 662 (Amendment No. 2 1987) on määritelty referenssikuristin 100 W suurpainenatriumlampulle. Referenssikuristimelle on ominaista jännite/virta-suhde, joka on lähes riippumaton virtavaihteluista, lämpötilasta sekä magneettisesta ympäristöstä. Referenssikuristinta käytetään lamppujen koestukseen, referenssilamppujen valintaan sekä vertailustandardina tuotantokuristimille.

Samoin kuin monimetallilamppujen kuristimet, varustetaan suurpainenatriumlamppujen kuristimet useammilla jänniteulosotoilla, jotta voidaan huomioida asennuspaikan jännitetaso. Tavallisimmat ulosotot ovat 220/230 V verkkojännitteen tehollisarvon nimellisarvon ollessa 220 V. Verkkojännitteen nimellisarvon noustessa arvoon 230 V, muuttuvat kuristimien jänniteulosotot vastaavasti arvoihin 230/240 V.

3.2.8.1.1 Suurpainenatriumlampun nelikulmiodiagrammi

Suurpainenatriumlampun toimintarajat saadaan määrättyä kuristimen ja lampun ominaiskäyriin perustuvan nelikulmiodiagrammin avulla, kuva 3.22. Lampun luotettavan toiminnan edellytyksenä on, että kuristimen ominaiskäyrä leikkaa minimi- ja maksimilamppujännitteiden (V_{min} , V_{max}) suorat ja säilyy minimi- ja maksimilampputehojen (P_{min} , P_{max}) välisellä alueella lampun koko eliniän ajan. Leikkauspisteiden välisellä alueella ei kuristimen ominaiskäyrä saa ylittää maksimitehon suoraa syöttöjännitteen ollessa välillä 95 % ja 105 % nimellisarvostaan. Nelikulmiodiagrammin maksimi- ja minimilampputehon sekä maksimi- ja minimilamppujännitteen määräytymistä käydään läpi seuraavassa.



Kuva 3.22 Nelikulmiodiagrammi 400 W suurpainenatriumlampulle.

Suurin sallittu lampputeho, ylempi rajakäyrä a, määräytyy purkausputken lämpötilan perusteella. Lampputehon kasvaminen merkitsee purkausputken lämpötilan nousua, mikä lyhentää lampun elinikää. Kuristimen ominaiskäyrän ja maksimitehon suoran välisen etäisyyden avulla otetaan huomioon kuristinvalmistuksessa tapahtuva hajonta. Maksimitehon suora asetetaan tavallisesti 20 - 30 % nimellistehoa suuremmaksi.

Pienimmän sallitun lampputehon, alempi rajakäyrä b, avulla varmistetaan riittävä valovirran tuotto, lampun riittävä stabiilisuus sekä lampun tyydyttävä lämpeneminen. Minimitehon suora asetetaan tavallisesti 20 - 30 % nimellistehoa pienemmäksi.

Vasen rajakäyrä c määrää pienimmän sallitun lamppujännitteen. Tämän avulla estetään liian suuri lamppuvirta sekä liian suuret tehohäviöt liitäntälaitteissa.

Oikeapuoleinen rajakäyrä d määrittää suurimman sallitun lamppujännitteen. Kun lamppujännite on liian suuri, ei kuristin enää pysty pitämään lamppua toiminnassa. Lampun maksimijännitteen suoran tulee olla sammumisjännitetä (drop-out- jännite) vastaavan suoran vasemmalla puolella. Maksimijännitteen suoran ja sammumisjännitteen suoran välinen etäisyys on tavallisesti 20 % lampun nimellisjännitteestä [30, 48].

Nelikulmiodiagrammin minimi- ja maksimijännitteiden sekä minimi- ja maksimitehojen arvot määräytyvät lampputehon perusteella. Standardissa IEC 662

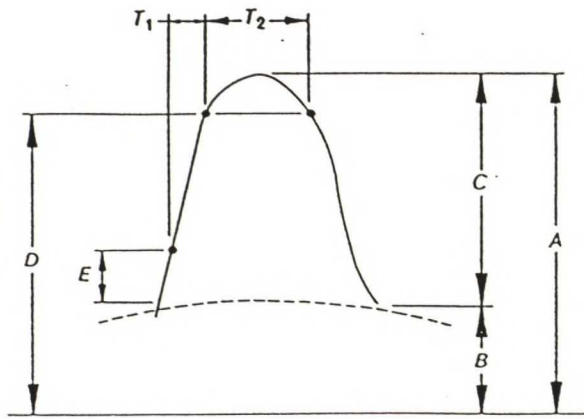
(High pressure sodium vapour lamps 1980) on esitetty 250 W ja 400 W suurpainenatriumlamppujen toimintarajat sekä tyypillinen kuristimen ominaiskäyrä. Lisäjulkaisussa em. standardiin (Amendment No. 1 1986) on määritelty 150 W lampun nelikulmiodiagrammi.

Värikorjatuille suurpainenatriumlampuille ei ole erillistä standardia. Näiden lamppujen tulee toimia samoilla kuristimilla kuin tavallisten suurpainenatriumlamppujen. Tällöin em. standardien nelikulmiodiagrammit lampputehon ja -jännitteen vaihtelurajoihin koskevat myös värikorjattuja suurpainenatriumlamppuja.

3.2.8.2 Sytytyslaitteet

Sytytyslaitteen avulla synnytetään lampun elektrodien välille jännitepulsseista muodostuva korkea jännite, jonka avulla läpilyönti kaasussa tapahtuu. Sytytyspulssit summautuvat verkkojännitteeseen. Sytytyspulssien tulee täyttää tietyt minimivaatimukset koskien niiden amplitudia, pulssin leveyttä sekä nousuaikaa. Pulssien sijainti suhteessa verkkojännitteeseen on myös otettava huomioon.

Standardissa IEC 662 (1980) on määritelty vaatimukset lamppujen tyyppikokeissa käytettävälle sytytyspulssille, jolla lampun tulee syttyä [47]. Standardissa määritellyn, verkkojännitteeseen summautuvan sytytyspulssin aaltomuoto on esitetty kuvassa 3.23. Pulssin amplitudin huippuarvo on mitattu verkkojännitteen nollakohdasta. Saman pulssin muut jännitepiikit eivät saa olla yli 50 % tästä huippuarvosta.



A = pulssin korkeus

B = $\sqrt{2}$ * koejännite

C = A - B

D = 0.90 * A

E = 0.30 * C

T₁ = nousuaika

T₂ = kesto aika

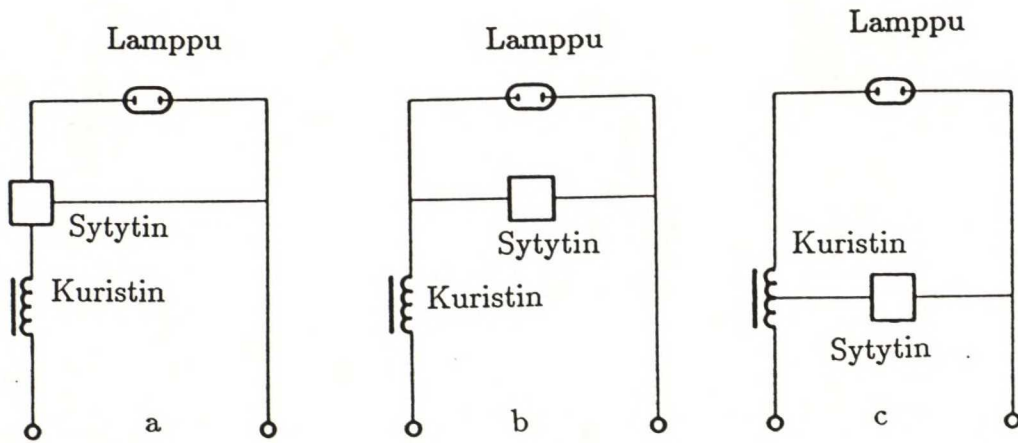
0 - jännitetaso

Kuva 3.23 Lamppustandardissa määritelty, lamppujen tyypikokeissa käytävä suurpainenatriumlampun sytytyspulssi. Jännite- ja aikaparametrit on määritelty kullekin lampputeholle erikseen standardin datalehdissä [47].

Kuvaan merkityt jännite- ja aikaparametrit on määritelty erikseen standardin kunkin lampputehon teknisissä tiedoissa. Julkaisussa IEC 662 on 250 W ja 400 W lamppujen tekniset tiedot. Lisäjulkaisussa tähän standardiin (Amendment No. 1 1986) on 150 W lampun tekniset tiedot. Toisessa lisäjulkaisussa (Amendment No. 2 1987) on määritelty 100 W lampun sytytyspulssi. Yleistettynä vaatimukset täyttää sytytyspulssi, jonka korkeus on 2800 V ja leveys 1 μ s pulssin laskevan osan 2500 V kohdalla ja joka toistuu jomman kumman verkkojännitteen puolijakson aikana. Pulssin tulisi sijaita 60-90 tai vaihtoehtoisesti 240-270 sähköasteen päässä verkkojännitteen nollakohdasta laskettuna [47].

Lamppuvalmistajat voivat myös antaa vaatimuksia lamppujen tarvitseman sytytyspulssin muodolle. Tästä on esimerkkinä tavallisen suurpainenatriumlampun värintoiston ($R_a = 25$) omaava lamppu, jonka valotehokkuutta on parannettu sytytyskaasuna käytetyn ksenonin painetta nostamalla. Lamppu ei korkeasta ksenonin paineesta johtuen syty standardien mukaisella sytytyspulssilla, vaan valmistajat ilmoittavat vaatimukset tarvittavalle sytytyspulssille.

Kuvassa 3.24 on esitetty suurpainenatriumlampun erilaiset sytytyslaitekytkennät. Kuvassa 3.24 a on sytytyslaitteen sytytysmuuntaja sarjassa kuristimen ja lampun välisessä johdossa. Kuvassa 3.24 b sytytyslaite on kytketty lampun rinnalle. Kuvassa 3.24 c sytytyslaite on kytketty kuristimen ulosottoon. Näiden kytkentöjen ominaisuuksia sekä sytytyslaitteiden rakennetta on käsitelty tarkemmin monimetallilamppujen yhteydessä luvussa 3.1.8.3 [30].



Kuva 3.24 Suurpainenatriumlampun sytytyslaitekytkentöjä:

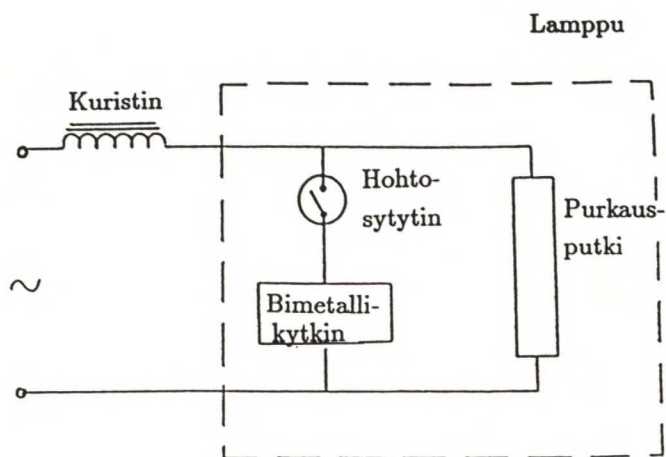
a=sytytyslaitteen sytytysmuuntaja sarjassa kuristimen ja lampun välisessä johdossa.

b=lampun rinnalle kytketty sytytyslaite.

c=kuristimen ulosottoon kytketty sytytyslaite.

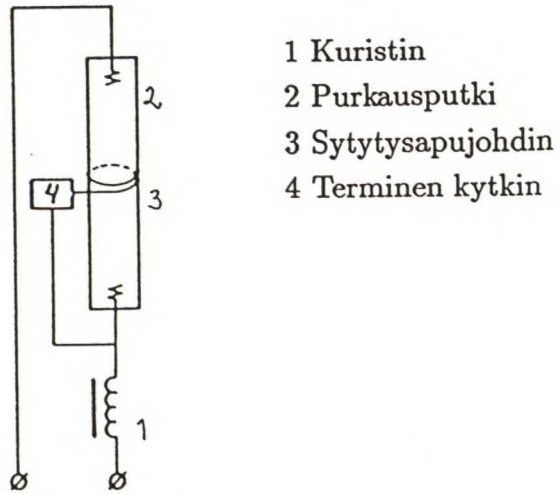
3.2.8.3 Ilman ulkoista sytytintä toimivat lamput

Tarvittava syttymisjännite voidaan synnyttää myös ulkokuvun sisällä olevan purkausputken rinnalle kytketyn sytyttimen avulla, kuva 3.25. Sytytin koostuu pienen kaasutäytteisen lasikuvun sisään sijoitetusta hohtosytyttimestä ja tämän kanssa sarjaan kytketystä bimetallikytkimestä. Hohtosytytin on loistelampun sytyttimen kaltainen sisältäen kaksi bimetalililiuskaa. Verkojännitteen kytkemisen jälkeen hohtopurkaus alkaa kuumentaa hohtosytyttimen bimetaliliuskoja, jotka sulkeutuvat muutaman sekunnin kuluttua jännitteen kytkemisestä. Bimetalililiuskojen sulkeuduttua hohtopurkaus lakkaa ja lampun kuristimen virta kasvaa oikosulkuvirtaa vastaavaan arvoonsa. Hohtopurkauksen loputtua bimetalililiuskojen lämpötila laskee ja ne avautuvat. Liuskojen sulkeutuminen ja avautuminen voi toistua useita kertoja. Avautumishetkellä äkillinen virran muuttuminen kuristimessa aiheuttaa jännitesykäyksen purkausputken elektrodien välille. Kun purkaus elektrodien välille on syttynyt ja lamppu lämmennyt bimetallikytin kytkee hohtosytyttimen pois virtapiiristä [49].



Kuva 3.25 Hohtosytyttimellä ja tämän kanssa sarjassa olevalla bimetallikytkimellä varustettu, ilman ulkoista sytytintä toimiva suurpainenatriumlamppu.

Kun sytytyskaasuna käytetään neon/argon-seosta (ns. Penning-seos) ja kun purkausputki varustetaan sytytysapujohtimella saadaan lamppu syttymään verkkojännitteellä ilman erillistä sytytintä. Neon/argon-seoksen käyttö alentaa syttymisjännitettä ksenonin käyttöön verrattuna. Volframia oleva sytytysapujohtin on kierretty ulkopuolelta purkausputken ympärille ja se on yhdistetty toiseen elektrodiin termisen kytkimen kautta, kuva 3.26. Sytytysapujohtimen tehtävänä on pienentää elektrodien tehollista välimatkaa, jolloin kaasun läpilyöntijännite alenee Paschenin lain [30] mukaan. Johtin on sijoitettu elektrodien väliin sellaiseen kohtaan, jossa saavutetaan pienin elektrodien välinen läpilyöntijännite. Purkausputken ympärillä oleva metallijohdin synnyttää korkeita paikallisia sähkökenttiä, jotka aiheuttavat haitallista elektrolyysiä (luku 4.5.5). Tämä estetään lampun lämmettyä avautuvan termisen kytkimen avulla [30].



Kuva 3.26 Purkausputken ympärille kierretyllä sytytysapujohtimella ja termisellä kytkimellä varustettu, ilman ulkoista sytytintä toimiva suurpainenatriumlamppu.

3.3 Yhteenveto

Monimetallilampun ja suurpainenatriumlampun toiminta perustuu purkausputkessa tapahtuvaan korkeapaineiseen kaasupurkaukseen. Purkausputkimateriaalina käytetään monimetallilamputta kvartsilasia (SiO_2) ja suurpainenatriumlamputta alumiinioksidia (Al_2O_3), joka kestää kuumen natriumhöyryn vaikutukset. Värikorjatun suurpainenatriumlampun parannettu värintoisto tavalliseen suurpainenatriumlamppuun nähden perustuu korotettuun natriumin höyrynpaineeseen purkausputkessa. Värikorjatut ja tavalliset suurpainenatriumlamput ovat rakenteeltaan samanlaisia purkausputkea lukuunottamatta.

Monimetallilampuissa ja suurpainenatriumlampuissa käytetään elohopeaa ns. puskurikaasuna. Syttymistä avustavana kaasuna käytetään monimetallilamputta argonia ja vaihtoehtoisesti neon/argon-seosta ja suurpainenatriumlamputta ksenonia tai vaihtoehtoisesti myös neon/argon-seosta. Varsinaiset valoa tuottavat aineet ovat monimetallilamputta halogeeniyhdisteiden metallit ja suurpainenatriumlamputta natrium. Lamppujen palaessa ei kaikki aine ole purkausputkessa höyrystyneenä, vaan sijaitsee tiivistyneenä purkausputken alhaisimman lämpötilan alueella kylmäpisteessä. Purkausputken kylmäpisteen lämpötila määrää aineiden höyrynpaineen ja sitä kautta lamppujen valotekniset ominaisuudet. Monimetallilamputta on ominaista rajoitettu polttoasento, koska polttoasennon muuttuessa muuttuvat usein sekä kylmäpisteen paikka että lämpötila. Suurpainenatriumlamputta polttoasennon muutokset eivät vaikuta kylmäpisteen lämpötilaan, joten lampun polttoasento on vapaa.

Lamppujen elektrodimateriaalina käytetään volframia, jonka sulamispiste on korkein minkä tiedetään millään metallisella alkuaineella olevan. Elektrodien emissioaineen tehtävänä on helpottaa elektronien irtoamista elektrodeilta. Ulkokuvun sisällä olevan getterin avulla pidetään lampun sisätila vapaana epäpuhtauksista.

Ulkokuvun tehtävänä on toimia purkausputken suojana sekä estää purkausputken lämpöhävikkiä. Lamppujen ulkokuvun materiaalina käytetään kovalasia. Kaksikantaisten ja erikoiskannalla varustettujen pienitehoisten yksikantaisten monimetallilamppujen ulkokuvun materiaalina käytetään kvartsilasia, jonka lämpötilakestävyys on parempi kuin kovalasin.

Kierrekantaisten monimetallilamppujen rinnalle on lampun kehityksen myötä tullut useita erityyppisiä erikoiskantalamppuja. Värikorjatuista suurpainenatriumlampuista löytyy tällä hetkellä sekä kierrekantalamppuja että pienikokoisia erikoiskantalamppuja.

Kaasupurkauksen negatiivisesta jännite-virta-käyrästä johtuen on purkauslampun virtaa rajoitettava. Monimetallilampulla ja suurpainenatriumlampulla virranrajoitukseen käytetään tavallisimmin lampun kanssa sarjaan kytkettävää induktiivista kuristinta. Kuristimen tehtävänä on pyrkiä pitämään lampputeho mahdollisimman lähellä nimellisarvoaan normaaleista verkkojännitevaihteluista huolimatta. Suurpainenatriumlampulla lampputehomuutoksia aiheuttaa verkkojännitevaihteluiden lisäksi lamppujännitteen kasvu lampun vanhenemisen myötä. Suurpainenatriumlampuille on määritelty kuristimen ja lampun ominaiskäyriin perustuva nelikulmiodiagrammi, jonka avulla saadaan määrättyä lampun toimintarajat. 100, 150, 250 ja 400 W suurpainenatriumlampuille on standardeissa määritelty referenssikuristimet. Monimetallilampun kuristimia ei ole vielä kansainvälisesti standardoitu.

Molemmat lamput vaativat syttyäkseen elektrodien välille synnytetyn korkean jännitteen, jonka avulla läpilyönti purkausputken kaasussa tapahtuu. Sytytysjännite synnytetään tavallisimmin ulkoisen sytyttimen avulla. Tarvittava syttymisjännite voidaan synnyttää myös lampun ulkokuvun sisällä olevan sytyttimen avulla.

4. Valontuotto

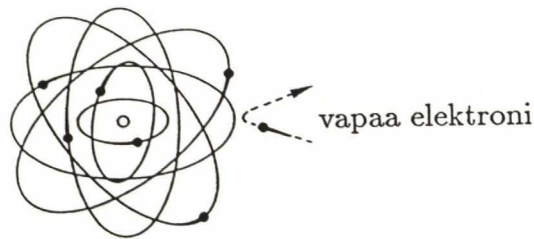
4.1 Lamppujen purkausputken kaasupurkaus

Monimetallilampun ja suurpainenatriumlampun valontuotto perustuu purkausputkessa tapahtuvaan korkeapaineiseen kaasupurkaukseen. Näiden lamppujen purkausputkissa käytettyjen erilaisten metallien johdosta poikkeavat lamppujen valotekniset ominaisuudet huomattavastikin toisistaan. Tässä luvussa esitetään aluksi kaasupurkauksen periaatteet ja tämän jälkeen perehdytään molempien lamppujen valontuoton yksityiskohtiin.

Purkauslampun valontuotto perustuu purkausputken kaasun saattamiseen joltavasta tilasta ja sähkövirran kulkuun elektrodien välillä. Kaasupurkauksen peruskäsitteitä ovat kaasun lämpeneminen, kaasun atomien ja molekyylien virittyminen sekä atomien ionisoituminen.

4.1.1 Kaasun lämpeneminen

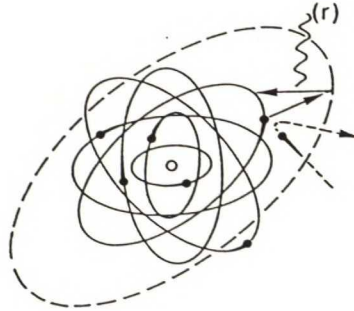
Kaasun lämpenemistä tapahtuu, kun pienen liike-energian omaava purkauksen vapaa elektroni törmää kaasuatomiin. Tässä kimmoisassa törmäyksessä osa vapaan elektronin liike-energiasta siirtyy atomille. Useiden törmäysten seurauksena kaasun lämpötila nousee [29].



Kuva 4.1 Kimmoisa törmäys elektronin ja atomin välillä. Elektroni luovuttaa osan liike-energiastaan atomille.

4.1.2 Kaasun atomien virittyminen

Vapaan elektronin liike-energian kasvaessa voi se törmätessään atomiin luovuttaa tälle niin suuren määrän energiaa, että atomin elektroni tämän energiamäärän absorboidessaan siirtyy atomissa ulommalle energiatasolle. Atomin ytimen sähköinen vetovoima aiheuttaa kuitenkin pian virittyneen elektronin palaamisen alkuperäiselle energiatasolle. Palautuminen alkuperäiselle tasolle voi tapahtua suoraan viritystilan tasolta tai yhden tai useamman energiatason kautta. Viritystilan lauetessa vapautuu atomin törmäyksessä absorboima energia sähkömagneettisena säteilynä. Säteilyä, joka syntyy elektronin pudotessa joltakin korkeammalta energiatasolta perustasolle kutsutaan resonanssisäteilyksi.



Kuva 4.2 Atomin virittyminen elektronin törmäyksen seurauksena. Viritystilan lauetessa atomin absorboima energia vapautuu sähkömagneettisena säteilynä (r).

Kunkin alkuaineen elektronien perättäisten tasojen energiaerotuksilla on määrätty suuruus. Alkuaineen elektroni voi ottaa energiaa vastaan energiatasojen erotuksien suuruusina annoksina, energiakvantteina, ja luovuttaa sitä yhtä suurina säteilyenergia-annoksina, valokvantteina. Atomin viritystilansa lauetessa luovuttaman valokvantin suuruus on suoraan verrannollinen syntyneen säteilyn taajuuteen yhtälön (4.1) mukaan

$$\epsilon = W_n - W_m = hf = hc/\lambda \quad (4.1)$$

missä

ϵ = valokvantti

W_n = energiatasolla n olevan elektronin energia

W_m = energiatasolla m olevan elektronin energia

h = Planckin vakio, $6.626 \cdot 10^{-34}$ Js

f = säteilyn taajuus

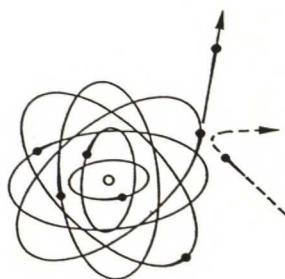
c = valon nopeus

λ = säteilyn aallonpituus

Koska perättäisten tasojen energiaerotuksella on täsmälleen määrätty suuruus, on kunkin alkuaineen lähettämällä säteilyllä alkuaineelle ominaiset aallonpituudet [29].

4.1.3 Kaasun atomien ionisoituminen

Kun purkauksen vapaa elektroni on saavuttanut niin suuren liike-energian, että se kykenee irrottamaan atomiin kuuluvan elektronin irti atomista, niin atomi tulee ionisoiduksi. Tämän sysäysionisaation seurauksena syntyy uusi vapaa elektroni sekä positiivinen ioni, joiden molempien johdosta kaasun johtavuus paranee. Vapautunut elektroni osallistuu atomien virittämiseen ja ionisoimiseen. Kaasun atomien tai molekyylien ionisoituminen on välttämätöntä jatkuvan sähkövirran syntymiseksi purkausputken elektrodien välille.



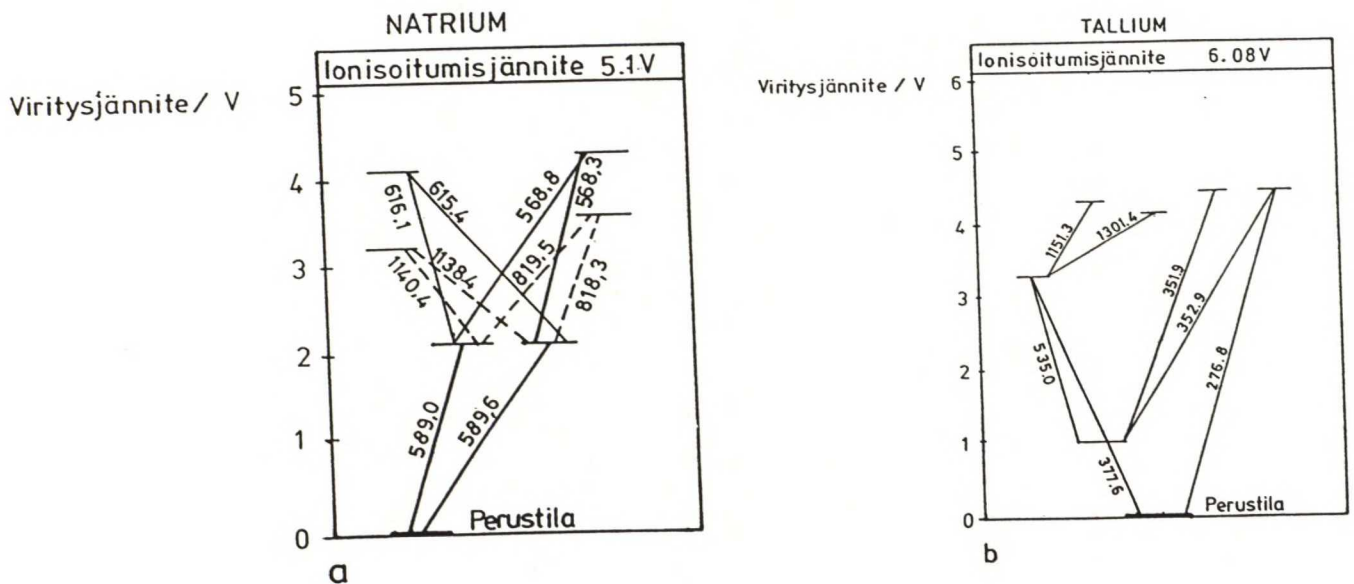
Kuva 4.3 Suuren liike-energian omaavan elektronin törmätessä atomiin syntyy uusi vapaa elektroni ja positiivinen ioni.

Kaasussa tapahtuu myös ionien jälleenyhtymistä elektronien kanssa neutraaleiksi atomeiksi [29].

4.1.4 Alkuaineiden energiatasokaavio

Sitä minimienergiaa, mikä tarvitaan atomin virittämiseen eli sen elektronin siirtämiseen ylemmälle energiatasolle, sanotaan alkuaineen viritysenenergiaksi. Vastaavasti sitä potentiaaliero, joka kykenee antamaan elektronille atomin virittämiseen riittävän liike-energian, kutsutaan viritysjännitteeksi. Atomin ionisoitumiseen tarvittavaa jännitettä kutsutaan ionisoitumisjännitteeksi.

Alkuaineen säteilyominaisuuksia voidaan esittää energiatasokaavion avulla. Kuvassa 4.4 on esitetty suurpainenatriumlampussa ja useissa monimetallilampuissa käytetyn natriumin sekä useissa monimetallilampuissa käytetyn talliumin energiatasokaaviot. Vaakasuora akseli esittää perustasoa ja sen yläpuolella olevat lyhyet vaakasuorat viivat ylempiä energiatasoja. Perustasoa korkeammat energiatasot on pystyakselilla olevan jänniteasteikon mukaan piirretty viritysjännitettä vastaaviin kohtiin. Elektronin pudotessa ylemmältä energiatasolta alemmalle syntyvän säteilyn aallonpituus on merkitty kuvaan nanometreinä. Kuviin ei ole selvyyden vuoksi merkitty kaikkia alkuaineiden lähettämän säteilyn aallonpituuksia. Resonanssisäteilyksi nimitetään säteilyä, joka syntyy elektronin pudotessa joltakin korkeammalta energiatasolta perustasolle. Kuvasta nähdään natriumin resonanssisäteilyn aallonpituuksien olevan 589.0 nm ja 589.6 nm sekä talliumin resonanssisäteilyn aallonpituuksien olevan 377.6 nm ja 276.8 nm [50].



Kuva 4.4 Natriumin (a) ja talliumin (b) energiatasokaaviot. Syntyvän säteilyn aallonpituudet merkitty nanometreinä.

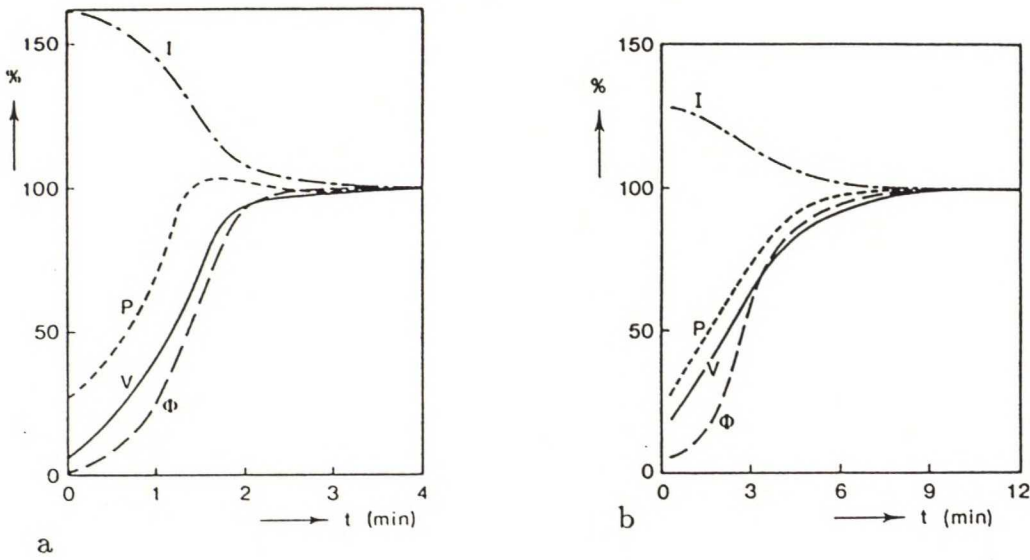
4.2 Kaasupurkauksen syttyminen

Mikäli purkausputken elektrodit yhdistetään verkkojännitteeseen, ei niiden välissä ala kulkea sähkövirtaa, koska normaalipaineessa ja heikossa sähkökentässä useimmat kaasut ovat hyviä eristeitä. Purkausputkessa olevan jalokaasun avulla alennetaan purkauksen syttymisjännitettä, joka korkeapaineisella purkauksella on kuitenkin niin suuri, että ulkoisen sytyttimen käyttö on välttämätöntä. Sytyttimen avulla synnytetään elektrodien välille niin suuri sähkökenttä, että elektrodien välillä alkaa sähkökentän kiihdyttäminä kulkea elektroneja.

Purkaus syntyy aluksi jalokaasussa. Jalokaasujen viritys- ja ionisaatioenergioiden suuruudet ovat hyvin lähellä toisiaan, joten purkaukseen syntyy useita vapaita elektroneja. Näiden elektronien törmäyksistä jalokaasun atomien kanssa on seurauksena purkausputken lämpötilan kasvu, jolloin purkausputkessa olevat metallit ja niiden yhdisteet alkavat höyrystyä. Metallien höyrönpaineen kasvaessa kasvaa myös virittyneiden metalliatomien määrä. Jalokaasujen suhteellisen korkeiden viritysenenergioiden johdosta metallit höyrystyessään virittyvät helpommin ja purkauksen säteily alkaa yhä enemmän muodostua metalliatomien lähettämästä säteilystä. Lämpenemisvaiheen loputtua saavutetaan tasapainotila, jossa lamppu on toimintalämpötilassaan ja jossa purkauksen säteilyllä on metalliatomien lähettämän säteilyn luonne.

Monimetallilampun ja suurpainenatriumlampun suureiden muuttumista lamppujen lämpenemisvaiheen aikana on esitetty kuvassa 4.5 [29]. Kuvissa on esitetty lampun virran I , lamppujännitteen V , lampputehon P sekä lampun valovirran ϕ muutokset ajan funktiona syttymishetkestä $t = 0$ lähtien.

Varsinaisen syttymistapahtuman jälkeen höyrönpaine lamppujen purkausputkessa on alhainen. Valovirta on heti syttymistapahtuman jälkeen pieni. Koska höyrönpaine osaltaan määrää lamppujännitteen, on myös lamppujännite aluksi alhainen. Tällöin lähes koko verkkojännite vaikuttaa lampun liitäntälaitteen yli. Tämän johdosta piirin virta (lamppuvirta) on lämpenemisvaiheen alussa suurempi kuin lampun lopullisessa toimintatilassa. Lämpötilan noustessa lisääntyy purkausputkessa olevien metallien höyrystyminen jolloin myös valovirta kasvaa. Höyrönpaineen kasvaessa kasvaa lamppujännite ja lamppuvirta vastaavasti pienenee. Lamppujännitteen kasvun myötä kasvaa myös lampputeho. Lopullisen toimintatilan saavuttaminen kestää monimetallilampulla tyypillisesti noin 4 - 6 minuuttia ja värikorjatulla suurpainenatriumlampulla noin 5 - 10 minuuttia.



Kuva 4.5 Monimetallilampun (a) ja suurpainenatriumlampun (b) suureiden muuttuminen lampun lämpenemisvaiheen aikana.

Monimetallilampun ja värikorjatun suurpainenatriumlampun valon väri syttymistapahtuman jälkeen ja lämpenemisvaiheen aikana poikkeaa huomattavasti lopullisesta väristään. Syttymistapahtuman jälkeen valo on aluksi jalokaasun synnyttämää. Metallien höyrynpaineen kasvaessa lisääntyy niiden osuus valontuotossa ja valon väri muuttuu. Monimetallilampun purkausputkessa olevat täytösaineet alkavat osallistua säteilyn tuottoon eri lämpötiloissa, minkä voi havaita valon värimuutoksina lampun lämpenemisen aikana. Suurpainenatriumlampun synnyttämän säteilyn spektri laajenee natriumin höyrynpaineen kasvun myötä.

Koska lampun toimintalämpötila on korkea, säilyy purkausputken höyrynpaine korkeana vielä jonkin aikaa lampun sammuttamisen jälkeen. Lampun jälleensyttyminen ei tällöin ole heti mahdollista, koska korkeasta höyrynpaineesta johtuen lampun syttymisjännite on liian korkea. Lampun on saatava jäähtyä jonkin aikaa ennen kuin jälleensyttyminen on mahdollista [29].

4.3 Korkeapaineisen kaasupurkauksen ominaisuuksia

Korkeapaineisessa kaasupurkauksessa purkaus on keskittynyt purkausputken keskiosaan, jossa sijaitsee purkauksen kuumin kohta (5000-7000 K). Purkausputken alhaisin lämpötila vallitsee putken seinämän lähellä. Purkausputken alhaisimman lämpötilan alueella sijaitsee ns. lampun kylmäpiste, jonka lämpötila on tyypillisesti noin 1000 K.

Metallien höyrynpaineen kasvaessa pienenee metalliatomien keskinäinen välimatka. Tällöin atomien keskinäinen vuorovaikutus lisääntyy, jonka seurauksena virittyneiden atomien lähettämän säteilyn aallonpituus levenee. Lisäksi höyrynpaineen kasvaessa purkauksen keskeltä lähtenyt alkuperäinen säteily absorboituu ja emittoituu useitakin kertoja, ennen kuin säteily saapu purkausputken seinämän alhaisemman lämpötilan alueelle ja lopulta läpäisee seinämän. Molempien ilmiöiden seurauksena säteilyn spektriviivat levenevät ja spektri saa jatkuvan luonteen [39].

4.4 Monimetallilampun valontuotto

4.4.1 Monimetallilampun purkausputken kaasupurkaus

Monimetallilampussa purkaus tapahtuu elohopeahöyryssä, johon on lisätty eri metallien halogeeniyhdisteitä.

Purkaus elektrodien välille syttyy jalokaasun avulla aiheuttaen lämpötilan kohoamisen purkausputkessa. Lämpötilan noustua tiettyyn arvoon alkaa elohopean höyrystyminen ja elohopea alkaa lähettää säteilyä. Metallihalogenidit ovat vielä kiinteässä muodossa suhteellisen alhaisen lämpötilan alueella purkausputken seinän lähellä. Purkausputken seinän lämpötilan noustessa alkavat metallihalogenidit höyrystyä. Ne kulkeutuvat höyryn muodossa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta kuumen purkaukskanavan alueelle. Purkauksen keskellä vallitsevan korkean lämpötilan (5000-7000 K) alueella yhdisteet hajoavat halogeeni- ja metalliatomeiksi. Purkauksen elektronit saavat hajoamisessa syntyneet metalliatomit viritystilaan, jonka lauetessa syntyy kullekin metallille ominaista sähkömagneettista säteilyä. Halogeenien spektriä ei synny, koska halogeenien viritysenergiat ovat suuria.

Metallien kulkeutuessa pois purkauskanavan alueelta ne hakeutuvat kylmemmän lämpötilan alueelle purkausputken seinämän lähelle. Siellä ne yhdistyvät uudestaan halogeenien kanssa. Tämä yhdistyminen on välttämätöntä, jotta metalliatomit eivät pääse reagoimaan purkausputken seinän tai elektrodimateriaalin kanssa.

Tämä kiertoprosessi toistuu jatkuvasti lampun palamisen aikana [39].

4.4.2 Käytetyt metalliyhdisteet

Jotta lampun toiminta olisi toivotunlaista ja valontuotto perustuisi edellä esitettyyn malliin, on elohopean kanssa käytetyillä metalliyhdisteillä oltava seuraavat ominaisuudet

- yhdisteiden höyrynpaineen on oltava riittävän korkeita halutun säteilyn syntymiseksi. Höyrynpaineen saavuttamiseen tarvittava lämpötila ei saa ylittää purkausputken seinän suurinta sallittua lämpötilaa.
- yhdisteiden hajoamislämpötilan on oltava suurempi kuin vallitseva seinän lämpötila, jotta yhdisteet eivät hajoa seinän lähellä ja pääse reagoimaan seinän tai elektrodimateriaalin kanssa.
- säteilyyn osallistuvien metallien viritysenergioiden on oltava pienempiä kuin muiden purkauksessa läsnä olevien aineiden.
- yhdisteet eivät saa olla haitallisia seinä- ja elektrodimateriaaleille [29].

On olemassa useita metallien halogeeniyhdisteitä, jotka täyttävät edellä esitettyt vaatimukset. Ensimmäisissä valmistetuissa monimetallilampuissa käytettiin natriumin, talliumin ja indiumin jodideja. Myöhemmin alettiin käyttää eri maametallien kuten myös muiden alkuaineryhmien metallien halogeeniyhdisteitä. Myös useamman metallin muodostaman ns. kompleksiyhdisteen käyttöä on tutkittu. Kunkin metallin lähettämällä säteilyllä on tälle metallille ominainen spektri.

Halogeeniryhmästä voidaan periaatteessa käyttää halogeenina bromia, klooria, fluoria ja jodia. Koska bromi, kloori ja fluori alkavat helposti reagoida muiden aineiden kanssa, on jodi yleisimmin käytetty halogeeni monimetallilampuissa. Metallijodidien höyrynpaineet ovat korkeampia kuin puhtaiden metallien samassa lämpötilassa. Metallijodidit eivät ole yhtä herkkiä reagoimaan muiden

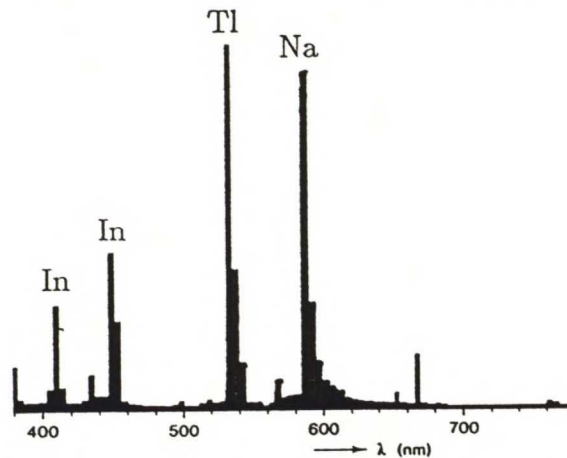
aineiden kanssa kuin niiden metallit. Yhdisteet eivät hajoa vallitsevassa purkausputken seinän lämpötilassa, joten ne eivät ole haitallisia kvartsille [29].

Useiden eri metalliyhdisteiden sopivuus purkaukseen mahdollistaa sen, että monimetallilampun spektristä saadaan halutunlainen yhdistämällä sopivien metallien halogeeniyhdisteitä. Monimetallilampun kehityksen aikana on lähes kaikkien alkuaineiden jaksollisen järjestelmän metallien käyttöä tutkittu. Osa näistä tutkimuksista on johtanut lamppujen kaupallisiin sovellutuksiin [27].

4.4.3 Spektrin muodostuminen

4.4.3.1 Epäjatkuvan spektrin omaavat lamput

Natriumin, talliumin ja indiumin jodideja sisältävän lampun säteily muodostaa spektrin, jossa hallitsevia ovat kolme voimakasta säteilyhuippua, kuva 4.6. Natrium lähettää voimakasta keltaista säteilyä aallonpituudella 589 nm, tallium vihreää säteilyä aallonpituudella 535 nm ja indium sinistä säteilyä aallonpituudella 451 nm sekä violettia aallonpituudella 410 nm. Spektrissä ei esiinny elohopealle tyypillisiä aallonpituuksia johtuen natriumin, talliumin ja indiumin pienemmistä viritysenenergioista elohopeaan nähden [29].



Kuva 4.6 Natriumin, talliumin ja indiumin säteilyyn perustuvan monimetallilampun spektri.

Koska natriumin, talliumin ja indiumin säteily on pääasiassa resonanssisäteilyä (luku 4.1.4) näkyvällä alueella on lampun valotehokkuus suhteellisen suuri.

Natrium- ja indiumjodidien osapaineiden suhdetta muuttamalla voidaan lampun värilämpötilaa muuttaa laajalla alueella. Värilämpötila voi vaihdella välillä 3600 - 7000 K. Lampun yleinen värintoistoindeksi on luokkaa $R_a = 65 - 70$ [1, 29].

4.4.3.2 Suhteellisen jatkuvan spektrin omaavat lamput

Maametallien ryhmään kuuluvien metallien säteily koostuu useista eri aallonpituuksista. Näkyvällä alueella spektri on lähes jatkuva lukuunottamatta skandiumiin perustuvaa lamppua.

Spektrin jatkuvuuden lisääntyessä lamppujen väriominaisuuksien herkkyyys purkausputken lämpötilavaihteluille vähenee. Lämpötilan vaihtelut aiheuttavat muutoksia höyrynpaineessa, josta on seurauksena lampun valontuoton ja väriominaisuuksien muuttuminen. Jatkuvan spektrin omaavilla lampuilla spektrin muuttuminen on suhteessa pienempää kuin lampuilla joiden spektriä hallitsevat muutamat värit [1].

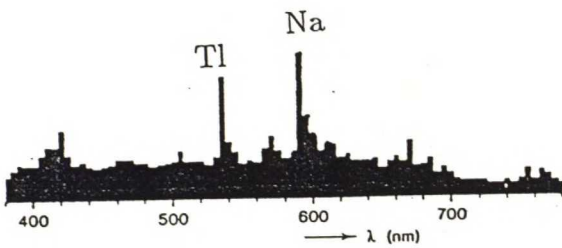
Kunkin maametallin säteilyllä on tälle ominainen spektrijakauma. Valon väriä voidaan parantaa yhdistämällä eri maametallien jodideja tai lisäämällä maametallijodidin rinnalle muiden alkuaineryhmien metallien jodideja. Pääkomponenttina lampuissa käytetään tavallisimmin dysprosiumia, tuliumia tai skandiumia. Näiden metallien jodidien höyrynpaineet ovat alhaisia lampun normaalissa toimintalämpötilassa, mistä johtuen purkausputken toimintalämpötilan on oltava suhteellisen korkea.

Dysprosiumia pääkomponenttina käyttävän lampun säteilyn spektri on lähes jatkuva. Dysprosiumin rinnalla käytetään mm. tuliumia ja holmiumia. Talliumia ja natriumia käytetään parantamaan valon väriominaisuuksia. Dysprosiumlampulle ominainen värilämpötila on 4000 - 6000 K ja värintoistoindeksi $R_a = 85 - 90$. Kuvassa 4.7 a on esitetty dysprosiumin (Dy), holmiumin (Ho), talliumin (Tl) ja natriumin (Na) säteilyyn perustuvan monimetallilampun spektri. Dysprosiumille ja holmiumille ovat ominaisia useat spektriviivat koko näkyvän valon alueella, jolloin spektri saa jatkuvan luonteen. Tallium synnyttää spektriviivan vihreälle alueelle aallonpituudella 535 nm ja natrium keltaiselle alueelle aallonpituudella 589 nm [27, 29].

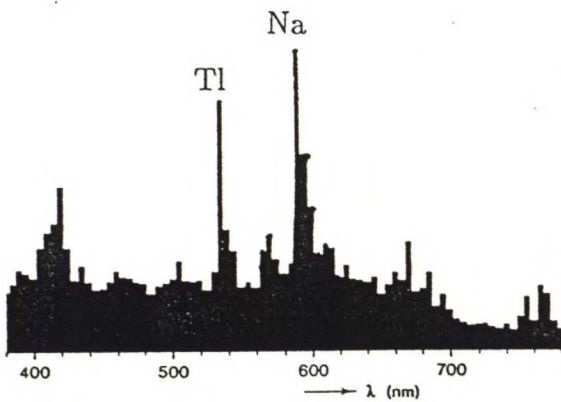
Tuliumia pääkomponenttina käyttävän lampun spektri on esitetty kuvassa 4.7 b. Tuliumin rinnalla lampussa käytetään dysprosiumia ja holmiumia sekä natriumia ja talliumia. Tuliumille, dysprosiumille ja holmiumille ovat ominaisia

useat spektriviivat koko näkyvän valon alueella. Tallium ja natrium parantavat lampun väriominaisuuksia spektriviivoillaan 535 nm (tallium) sekä 589 nm (natrium) [29].

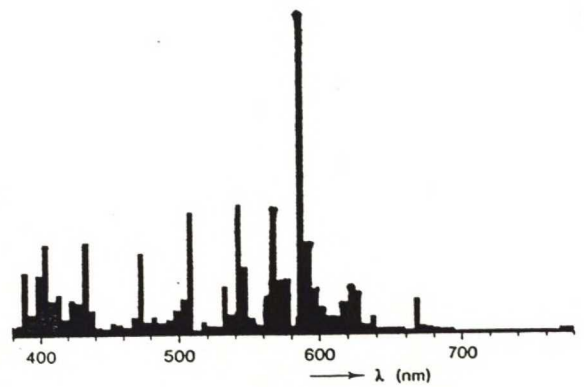
Skandium-, natrium- ja toriumjodideja sisältävän lampun spektri muodostuu useista aallonpituuksista, mutta spektri ei kuitenkaan ole jatkuva, kuva 4.7 c. Spektristä puuttuu lähes kokonaan punaisen valon osuus. Purkauksen värilämpötila on korkea, noin 4500 K. Lampun yleinen värintoistoindeksi on luokkaa $R_a = 65 - 70$ [12, 29].



a



b



c

Kuva 4.7 Eri metalliyhdisteitä sisältävien monimetallilamppujen spektri-
kaumia :

a = dysprosium-pohjainen lamppu

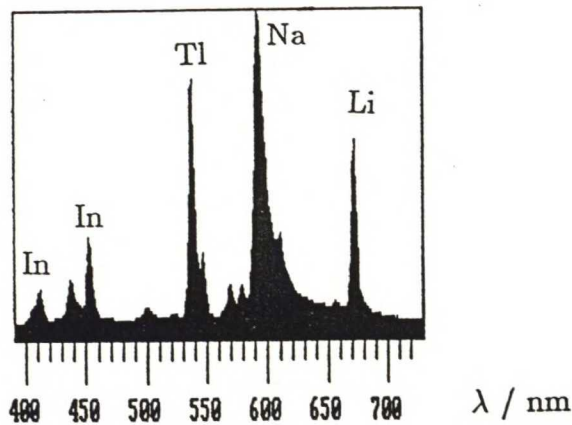
b = tulium-pohjainen lamppu

c = skandium-natrium-torium-lamppu.

Skandiumlampun punaisen valon osuutta voidaan lisätä päällystämällä lampun ulkokupu tiettyjen aallonpituuksien säteilyä absorboivalla jauheella. Eräs valmistaja on kehittänyt lampun, jossa käytetään kahta eri koostumuksen omaavaa

jauhetta lisäämään punaisen valon osuutta. Näistä yttriumvanadaatti absorboi pääasiassa ultraviolettisäteilyä ja magnesiumfluorogermanaatti pääasiassa sinistä valoa. Lampun värilämpötila alenee näiden jauheiden käytön myötä. Lampun ulkokuvun päällystäminen alentaa lampun valotehokkuutta. Skandiumlampujen, joiden ulkokupu on päällystetty, värilämpötila on luokkaa 3200 K [12].

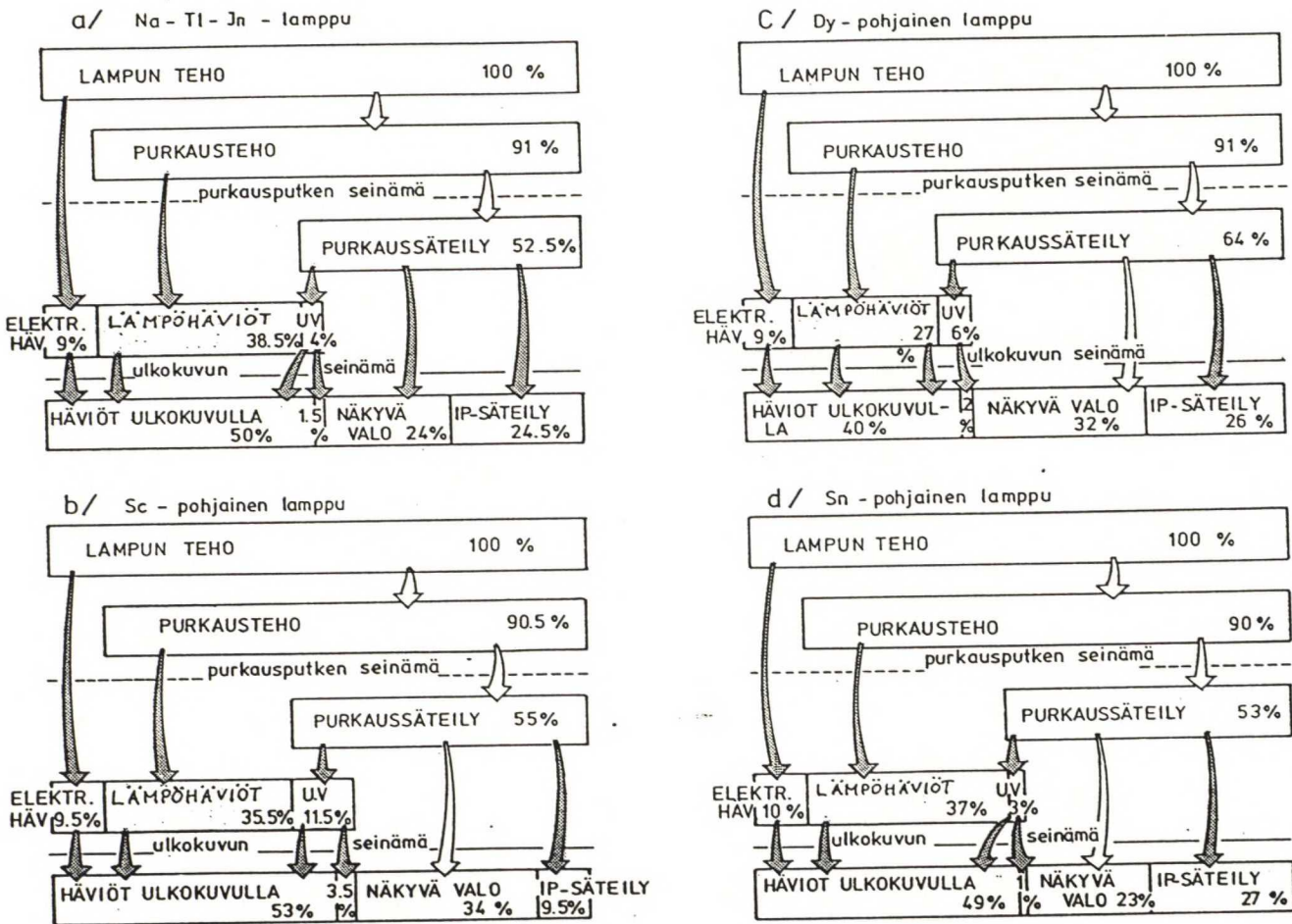
Tietyt halogeeniyhdisteet ovat niin vakaita, etteivät ne hajoa kaasupurkauksen ympäristössä vallitsevissa korkeissakaan lämpötiloissa. Tällöin purkauksen ytimen molekyyliitiheys on niin suuri, että molekyylien keskinäisestä vuorovaikutuksesta johtuen syntyy jatkuvan spektrin omaavaa säteilyä. Tinan halogeeniyhdisteillä on edellä mainittu ominaisuus. Halogeeneina lampuissa käytetään klooria ja jodia. Tinan halogeeniyhdisteet ovat täysin höyrystyneitä lampun toimintatilassa. Tästä johtuen voidaan lampun värilämpötilaan vaikuttaa suoraan muuttamalla metalliyhdisteiden konsentraatioita. Värilämpötila voidaan valita alueelta 3000-6000 K. Tina-pohjaisen lampun värintoistoindeksi on luokkaa $R_a = 80 - 85$. Lampun väriominaisuuksiin voidaan vaikuttaa lisäämällä purkaukseen myös muita metalleja. Kuvassa 4.8 on esitetty tinan (Sn), natriumin (Na), talliumin (Tl), indiumin (In) sekä litiumin (Li) säteilyyn perustuvan monimetallilampun spektri. Tina synnyttää jatkuvan spektrin koko näkyvän valon alueella. Kuvaan on merkitty muiden metallien synnyttämät spektriviivat. Lampun värilämpötila on 3000 K [29].



Kuva 4.8 Tina-pohjaisen monimetallilampun spektrijakauma.

4.4.4 Tehojakauma

Lamppuun syötetyn tehon jakautuminen monimetallilampuissa riippuu käytetyistä metalliyhdisteistä, lampputyypistä ja lampputehosta. Kuvassa 4.9 on esitetty tehon jakautuminen 400 W monimetallilampuissa, joiden täytösaineet poikkeavat toisistaan. Tarkasteltujen lamppujen valoa tuottavina aineina ovat natrium-tallium-indium, kuva 4.9 a ja natrium-skandium, kuva 4.9 b. Kuvan 4.9 c tehojakauma on dysprosium-pohjaisen lampun ja kuvan 4.9 d tina-pohjaisen lampun [29]. Näitä tehojakaumia käydään tarkemmin läpi seuraavassa.



Kuva 4.9 400 W monimetallilampun tehojakaumia.

Osa lamppuun syötetystä tehosta kuluu elektrodien lämpötilan ylläpitämiseen riittävän korkeana elektronien emissiota varten. Tästä elektroleilla kuluvasta

tehosta osa emittoituu lämpösäteilynä ja osa johtuu lämpönä pois elektrodeilta. Elektrodihäviöt 400 W lampulla ovat noin 10 % eli 40 W. Pienitehoisella lampulla elektrodihäviöiden prosentuaalinen osuus kokonaistehosta on suurempi kuin suuritehoisella lampulla. Esimerkiksi 100 W natrium-skandium-lampun elektrodihäviöt ovat 13.2 % kokonaistehosta. Suuremmasta elektrodihäviöiden osuudesta johtuen pienitehoisen lampun valotehokkuus jää pienemmäksi kuin suuritehoisella lampulla.

Purkaukseen siirtyvästä tehosta osa muuttuu purkausputkessa lämmöksi, joka auttaa ylläpitämään riittävän ionisaatiotason purkauksessa. Jäljelle jäävä teho muuttuu säteilyksi, joka sisältää näkyvän valon (400 - 780 nm) lisäksi säteilyä ultraviolettialueella (100 - 400 nm) sekä infrapuna-alueella (780 - 2500 nm).

Säteilyksi muuttuvan tehon osuus ja säteilyn jakautuminen spektrin eri alueille riippuu käytetyistä metalliyhdisteistä. Tarkastelluilla lampuilla säteilytehon osuus kokonaistehosta on 52.5 - 64 % eli 210 - 256 W.

Suurin UV-säteilytehon osuus tarkastelluissa tehojakaumissa on natrium-skandium-lampulla, jolla UV-säteilytehon osuus kokonaistehosta on 11.5 % eli 46 W. Tina-pohjaisella lampulla vastaava osuus on pienin, 3 % eli 12 W. Lampuissa, joiden ulkokupu on kovalasia, osa UV-säteilystä muuttuu lampun ulkokuvulla lämmöksi, pieni osa läpäisee ulkokuvun. Lampuissa, joiden ulkokupu on kvartsilasia, ulkokupu läpäisee suurimman osan purkauksessa syntyneestä UV-säteilystä.

Natrium-skandiumlampulla on myös tarkastelluista lampuista suurin näkyvän valon säteilytehon osuus, 34 % kokonaistehosta eli 136 W. Tina-pohjaisella lampulla tämä osuus on 23 % eli 92 W. Lampun valotehokkuus riippuu näkyvän valon säteilytehon osuuden lisäksi tämän valon jakautumisesta spektrissä. Tarkastelluista lampuista suurin valotehokkuus, 97 lm/W, on natrium-skandium-lampulla. Tarkastellun natrium-tallium-indium-lampun valotehokkuus on 87 lm/W, dysprosium-pohjaisen lampun 81 lm/W ja tina-pohjaisen lampun 60 lm/W. Näissä valotehokkuuksien arvoissa ei ole huomioitu lamppujen liitäntälaitteiden tehonkulutusta.

Tarkastelluista lampuista pienin infrapunasäteilyn osuus on natrium-skandium-lampulla, 9.5 % kokonaistehosta eli 38 W. Muilla lampuilla vastaava osuus on 24.5 - 27 % eli 98 - 108 W.

Purkauksessa ja elektrodeilla lämmöksi muuttunut teho sekä osa syntyneestä UV-säteilystä siirtyy lampun ulkokuvun kautta lämpösäteilyn, konvektion ja konduktion avulla ympäröivään ilmaan. Ulkokuvulle siirtyvä teho tarkasteluilla lampuilla on 40 - 53 % kokonaistehosta.

Esitetyt tehojakaumat ovat tyypillisiä 400 W monimetallilampuille käytettäessä valoa tuottavina aineina mainittuja metalleja. Samoja metalliyhdisteitä sisältävien erityyppisten lampujen tehojakaumat saattavat kuitenkin poiketa edellä esitetyistä. Tämä johtuu siitä, että tehon jakautuminen monimetallilamputta riippuu käytettyjen metalliyhdisteiden ohella mm. purkausputken seinämän tehokuormituksesta ja sitä kautta lämpötilasta purkausputkessa sekä purkausputken muodosta ja lampun rakenteesta. Lisäksi samantyyppisten, mutta eritehoisten monimetallilampujen tehojakaumat poikkeavat hieman toisistaan [29, 51].

4.4.5 Valovirran muutokset polttoain aikana

Monimetallilampun valovirran alenema polttoain aikana johtuu pääasiallisesti elektrodimateriaalin höyrystymisestä, purkausputken läpäisykyvyn alentumisesta tummumisen johdosta sekä yhdisteiden kemiallisen tasapainon muuttumisesta purkausputkessa.

Elektrodimateriaalin höyrystyminen on voimakkainta lampun syttymisvaiheen aikana. Höyrystynyt volframi saostuu purkausputken sisäseinämille estäen valon läpäisyn seinän läpi. Saostuma häiritsee myös purkausputken lämpötasapainoa, jolloin purkaukseen osallistuvien aineiden keskinäinen suhde muuttuu. Tämä voi aiheuttaa värimuutoksien lisäksi muutoksia valovirrassa.

Elektrodimateriaalin höyrystyminen riippuu elektrodien rakenteesta sekä elektrodien rasittavan virran suuruudesta.

Monimetallilampun useista aineosista johtuen purkausputkessa tapahtuu lukuisia kemiallisia reaktioita, joihin myös purkausputkessa olevilla epäpuhtauksilla on vaikutuksensa. Purkausputken aineosat voivat reagoida purkausputken kvartsilasin ja elektrodien kanssa. Erilaiset reaktiot saattavat aiheuttaa purkausputken tummumista sekä yhdisteiden kemiallisen tasapainon muuttumista [7, 29].

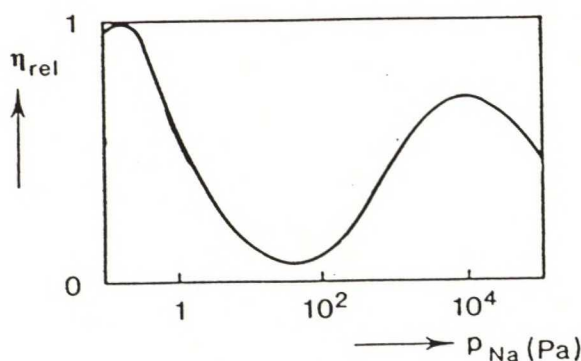
4.5 Suurpainenatriumlampun valontuotto

4.5.1 Natriumpurkaus

Natriumpurkaukseen perustuvan purkauslampun valontuotto ja väriominaisuudet riippuvat natriumin höyrynpaineesta purkausputkessa. Suurpainenatriumlampun valontuotto perustuu korkeapaineiseen kaasupurkaukseen, jossa pääasiallisena valoa tuottavana aineena on natrium. Lampun värikorjaus perustuu korotettuun natriumin höyrynpaineeseen.

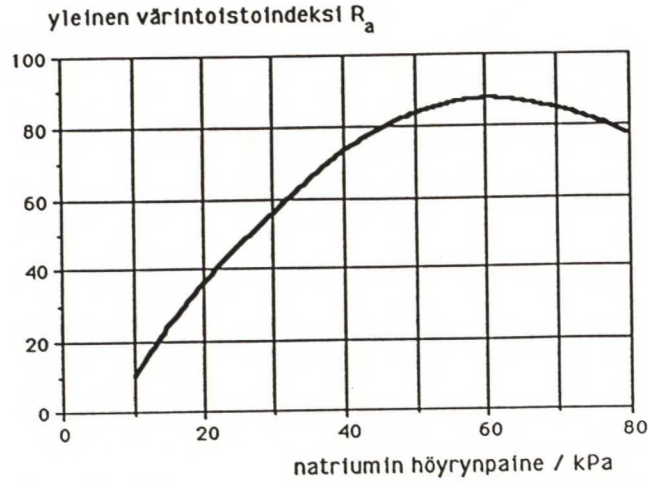
Kuvissa 4.10 - 4.12 on esitetty natriumpurkauksen ja siihen perustuvien lamppujen ominaisuuksia [30, 46, 51]. Kuvien yksityiskohtainen tarkastelu suoritetaan tässä luvussa pienpainaiseen ja suurpainaiseen natriumpurkaukseen perustuvien lamppujen ominaisuuksien yhteydessä.

Kuvassa 4.10 on esitetty natriumpurkauksen suhteellisen valotehokkuuden riippuvuus natriumin höyrynpaineesta. Purkauksen valotehokkuuden suurin arvo saavutetaan natriumin höyrynpaineen ollessa noin 0.5 Pa. Natriumin höyrynpaineen ollessa noin 10 kPa saa valotehokkuus toisen maksimiarvon.

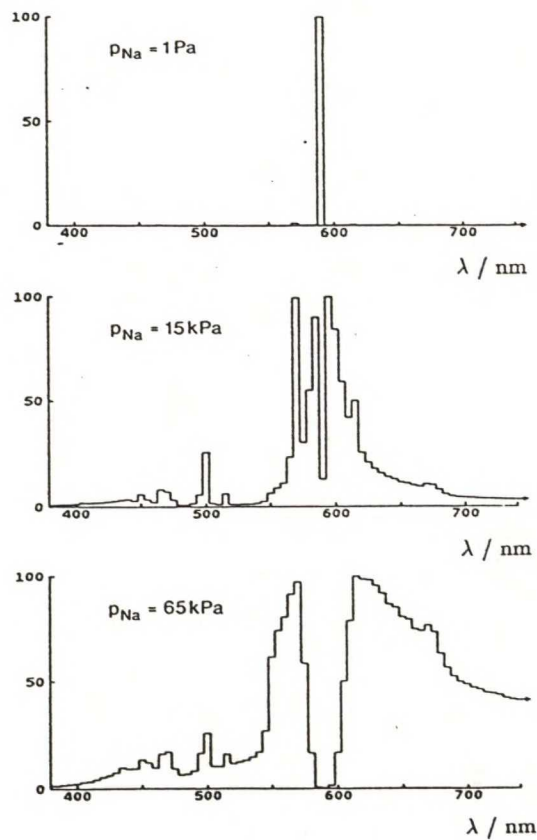


Kuva 4.10 Natriumpurkauksen suhteellisen valotehokkuuden η_{rel} riippuvuus natriumin höyrynpaineesta p_{Na} .

Kuvassa 4.11 on esitetty natriumpurkaukseen perustuvan lampun värintoistindeksin riippuvuus natriumin höyrynpaineesta. Kuvassa 4.12 on esitetty natriumpurkauksen spektrijakaumia erilaisilla natriumin höyrynpaineen arvoilla.



Kuva 4.11 Lampun värintoistoindeksin riippuvuus natriumin höyrynpaineesta.



Kuva 4.12 Natriumpurkaukseen perustuvan lampun spektrijakaumia erilaisilla natriumin höyrynpaineen p_{Na} arvoilla.

Seuraava tarkastelu perustuu edellä oleviin kuviin.

Pienpainennatriumlampussa natriumin höyrynpaine on noin 1 Pa. Tässä höy-

rynpaineessa natriumlampun valontuotto perustuu natriumin lähettämään säteilyyn aallonpituuksilla 589.0 nm ja 589.6 nm. Säteily näillä aallonpituuksilla on natriumin resonanssisäteilyä, jonka intensiteetti on suuri. Mainittuja aallonpituuksia nimitetään natriumin D-resonanssiviivoiksi. Koska säteily näillä aallonpituuksilla on lähellä suhteellisen silmäherkkyyskäyrän maksimia (555 nm) on lampun valotehokkuus suuri (100...200 lm / W). Koska pienpaine-natriumlampun valo sisältää olennaisesti pelkkää yksiväristä keltaista säteilyä, ovat lampun värintoisto-ominaisuudet huonot.

Atomi- ja molekyylietiheyden kasvaessa purkausputken paineen nousun seurauksena levenevät spektriviivat hiukkasten välisten törmäys- ja absorptioilmiöiden johdosta.

Natriumin höyrynpaineen noustessa purkauksessa alkaa vaikuttaa itseisabsorptio, jossa samassa lämpötilassa olevat natriumatomit absorboivat toistensa lähettämää säteilyä. Lisäksi plasmassa olevien natriumatomien lämpötilaero aiheuttaa säteilyn spektriviivojen siirtymistä. Plasman reunoilla oleva, useita perustilassa olevia atomeja sisältävä alhaisemman lämpötilan kaasu absorboi plasman keskellä olevien korkeamman lämpötilan atomien lähettämää D-resonanssisäteilyä.

Absorptioilmiöiden seurauksena spektriin syntyy kuoppa alkuperäisten D-resonanssiviivojen kohdalle ja spektrissä alkaa esiintyä säteilyä aallonpituuksilla molemmiin puolin alkuperäisiä D-resonanssiaallonpituuksia. Spektriin syntyy säteilyvoimakkuuden huiput molemmiin puolin D-resonanssiaallonpituuksia.

Natriumin höyrynpaineen kasvun myötä alkaa natrium lähettää säteilyä myös resonanssisäteilyn aallonpituuksista poikkeavilla aallonpituuksillaan. Valotehokkuuden kannalta tärkeä säteilyhuippu esiintyy aallonpituudella 568.8 nm, joka on lähellä suhteellisen silmäherkkyyskäyrän maksimia.

Resonanssiviivojen vaimenemisen johdosta purkauksen valotehokkuus laskee. Toisaalta spektrin leveneminen parantaa valon värintoistoa. Spektrin levenemisen johdosta säteilyn väripiste siirtyy pois keltaiselta alueelta aiheuttaen värilämpötilan kasvun.

Tavallisessa suurpainenatriumlampussa natriumin höyrynpaine on luokkaa 10 - 15 kPa. Lampun värilämpötila on noin 2050 K ja yleinen värintoistoindeksi $R_a = 20 - 25$. Lampun valotehokkuus on 70 - 130 lm/W lampputyypistä ja -tehosta riippuen.

Natriumin höyrynpaineen yhä kasvaessa spektrissä oleva D-resonanssihiivien kohdalle syntynyt kuoppa syvenee ja levenee. Spektriviivat näin syntyvän tumman alueen molemmiin puolin lisääntyvät, jolloin valon värinvalominaisuudet paranevat. Natriumin höyrynpaineen kasvun myötä purkauksen valotehokkuus laskee yhä. Tämä johtuu siitä, että säteily leviää yhä enemmän spektrin siniselle ja punaiselle alueelle, jossa silmän herkkyys on alhainen.

Natriumin höyrynpaineen ollessa noin 30 kPa on lampun värilämpötila 2150 K ja yleinen värinvalomitoitusindeksi $R_a = 60$. Lampun valotehokkuus on 80 - 110 lm/W. Kun natriumin höyrynpaine on noin 65 kPa on lampun värilämpötila noin 2500 K ja värinvalomitoitusindeksi $R_a = 85$. Lampun valotehokkuus on 40 - 70 lm/W. Näin korkealla natriumin höyrynpaineella spektriviivat alkuperäisten D-resonanssihiivien molemmiin puolin ovat levinneet niin, että niiden säteilyvoimakkuus on huomattava aallonpituusalueella 540 - 920 nm. Natriumin höyrynpaineen yhä kasvaessa alkaa värinvalomitoitusindeksin arvo laskea, joten suurin saavutettava natriumpurkauksen värinvalomitoitusindeksi $R_a = n. 85$ [30, 39, 46].

4.5.2 Värikorjatun suurpainenatriumlampun purkausputken kaasupurkaus

Purkauksen syttyessä elektrodien välille jalokaasun avulla alkaa lämpötila purkausputkessa kohota. Valo on aluksi pääasiassa elohopealle tyypillistä valkoista valoa johtuen siitä, että elohopen höyrynpaine kasvaa nopeammin suhteessa natriumin höyrynpaineeseen. Natriumin höyrynpaineen kasvaessa lämpötilan kohoamisen myötä muuttuu valo keltaiseksi. Natriumin höyrynpaineen yhä kohotessa natriumin synnyttämä spektri levenee ja väripiste siirtyy pois keltaiselta alueelta. Lampun lämpeneminen eli lopullisen toimintapisteen saavuttaminen kestää tyypillisesti noin 5 - 10 minuuttia.

Lampun palaessa on purkausputkessa aina nestemäistä amalgaamia, joka sijaitsee lähellä lampun kylmäpistettä. Kylmäpisteen lämpötilan kohotessa kasvaa natriumin höyrynpaine. Tavallisessa suurpainenatriumlampussa natriumin höyrynpainetta 5 - 15 kPa vastaava kylmäpisteen lämpötila on noin 650 - 700°C. Värikorjatussa suurpainenatriumlampussa 65 kPa natriumin höyrynpainetta vastaava kylmäpisteen lämpötila on noin 850°C.

Kun lamppu sammutetaan natrium- ja elohopeahöyryt tiivistyvät purkausputken alhaisemman lämpötilan alueelle elektrodin lähelle [30].

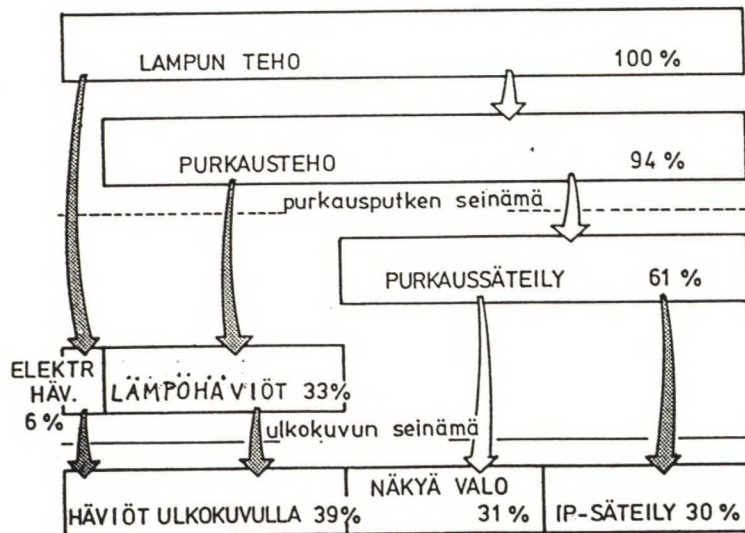
4.5.3 Värikorjatun suurpainenatriumlampun spektri

Värikorjatut suurpainenatriumlamput voidaan jaotella kahteen ryhmään valon väriominaisuuksien perusteella. Yleinen värintoistoindeksi saa tässä jaottelussa arvot $R_a = 60 - 65$ ja $R_a = 80 - 85$. Näitä värintoistoindeksejä vastaavien spektrien koostumusta on käsitelty edellisessä luvussa.

Purkausputkessa oleva elohopea lisää hieman spektrin punaisen valon osuutta. Syttymistä avustavana jalokaasuna käytetty ksenon lisää hieman spektrin keltaanvihreää osuutta [46].

4.5.4 Tehojakauma

Lamppuun syötetyn tehon jakautuminen suurpainenatriumlampussa riippuu natriumin höyrynpaineesta purkausputkessa, lampun tehosta, purkausputken mitoista sekä käytetystä sytytyskaasusta. Seuraavassa tarkastellaan 400 W värikorjatun suurpainenatriumlampun tehojakaumaa, jota havainnollistaa kuva 4.13 [30].



Kuva 4.13 Värikorjatun ($R_a = 85$) 400 W suurpainenatriumlampun tehojakauma.

Osa lamppuun syötetystä tehosta kuluu elektrodien lämpötilan ylläpitämiseen riittävän korkeana elektronien emissiota varten. Tästä elektrodeilla kuluvasta

tehosta osa johtuu lämpönä purkausputken päihin ja osa emittoituu lämpösäteilynä. Elektrodihäviöt ovat tyypillisesti noin 5 - 20 % lampun kokonaistehosta, tarkasteltavalla lampulla ne ovat 24 W eli 6% kokonaistehosta. Pienitehoisen lampun elektrodihäviöiden osuus kokonaistehosta on suurempi kuin suuritehoisen lampun.

Purkaukseen siirtyvästä tehosta osa muuttuu purkausputkessa lämmöksi, joka auttaa ylläpitämään riittävän ionisaatiotason purkauksessa. Loppuosa purkaustehosta muuttuu säteilyksi. Säteilyteho jakaantuu säteilyksi ultraviolettialueella (100 - 400 nm), näkyvän valon alueella (400 - 780 nm) sekä infrapuna-alueella (780 - 2500 nm).

Suurpainenatriumlampuilla UV-säteilyksi muuttuvan tehon osuus kokonaistehosta on noin 0.5 %.

Näkyvän säteilyn säteilytehon osuus kokonaistehosta on 400 W värikorjatulla lampulla 31 % eli 124 W. Tämä osuus on saman suuruinen myös tavallisella suurpainenatriumlampulla. Värikorjatun lampun näkyvän valon valotehokkuus on kuitenkin alhaisempi, mistä johtuen lampun valotehokkuus jää pienemmäksi.

Infrapunasäteilyn säteilytehon osuus kokonaistehosta on 400 W värikorjatulla lampulla on 30 % eli 120 W. Vastaava osuus on hiukan suurempi kuin tavallisella suurpainenatriumlampulla. Tämä johtuu natriumin höyrynpaineen kasvun aiheuttamasta spektriviivojen lisääntymisestä infrapuna-alueella.

Purkauksessa ja elektrodeilla lämmöksi muuttunut teho siirtyy lampun ulkokuvun kautta lämpösäteilyn, konvektion ja konduktion avulla ympäröivään ilmaan. Ulkokuvulle siirtyvän tehon osuus kokonaistehosta on 400 W värikorjatulle lampulle on 39 % eli 156 W.

Tarkastellun 400 W lampun valotehokkuus on 72 lm/W (kun liitäntälaitteen tehonkulutusta ei huomioida). Vastaavan värintoistoindeksin omaavan 50 W lampun valotehokkuus on 42 lm/W. Pienempitehoisen lampun alhaisempi valotehokkuus johtuu elektrodihäviöiden sekä konduktio- ja absorptiohäviöiden suhteellisen osuuden kasvamisesta kun elektrodiväli pienenee ja purkausputki kapenee.

Natriumin höyrynpaineen laskiessa paranee lampun valotehokkuus. Tavallisen 400 W suurpainenatriumlampun, jonka yleinen värintoistoindeksi $R_a = 23$, valotehokkuus on luokkaa 120 lm/W. Värikorjatun 400 W lampun, jonka yleinen värintoistoindeksi $R_a = 65$, valotehokkuus on luokkaa 80 - 100 lm/W [30].

Tavallisen suurpainenatriumlampun valotehokkuus laskee noin 20 %, kun sytytyskaasuna käytetään neonin ja argonin seosta ksenonin sijasta. Syynä on neon/argon-seoksen suurempi lämmönjohtokyky ja siitä johtuva konduktiohäviöiden kasvu. Sytytyskaasu määrää kaasun lämmönjohtavuuden, kun sytytyskaasun paineen suhde natriumin höyrynpaineeseen ylittää tietyn rajan. Värikorjatuilla lampuilla neon/argon-seoksen vaikutus valotehokkuuteen muuttuu merkityksettömäksi korkeasta natriumin paineesta johtuen [52].

4.5.5 Lamppujännitteen kasvu polttoain aikana

Säteilyn tuottoon osallistuvan natriumin määrä vähenee purkausputkesta lampun eliniän aikana. Tämä johtuu purkausputkessa tapahtuvasta natriumhävikistä. Natriumhävikkiä aiheuttavat natriumin kulkeutuminen pois purkausputkesta sekä natriumin reagointi purkausputkimateriaalin kanssa.

Natriumia kulkeutuu pois purkausputkesta virtaläpivientien kautta. Purkausputken virtaläpivientimateriaalin resistiivisyys natriumhöyryä vastaan pienenee natriumin höyrynpaineen kasvaessa. Virtaläpivientien tiiviytteen on kiinnitettävä erityistä huomiota värikorjatuissa lampuissa, joissa natriumin höyrynpaine on korkea.

Sähkökentän aiheuttaman natriumin elektrolyysin seurauksena natriumia kulkeutuu monikiteisestä alumiinioksidista (Al_2O_3) valmistetun purkausputken läpi. Elektrolyysi-ilmiön esiintyminen riippuu purkausputken sisä- ja ulkopuolen välillä vaikuttavan sähkökentän voimakkuudesta. Sähkökenttä saattaa aiheuttaa natriumin läpilyöntivirran purkausputken seinämän läpi. Purkausputken ympärillä olevat sytytysapujohtimet synnyttävät voimakkaita sähkökenttiä ja voivat myös aiheuttaa elektrolyysiä. Safiirista valmistetuissa purkausputkissa ei vastaavaa natriumin elektrolyysiä ole havaittu.

Natriumin höyrynpaineen ja purkausputken seinämien lämpötilan kasvaessa natriumhöyry alkaa reagoida purkausputkimateriaalin kanssa. Tällöin alkaa esiintyä useita monimutkaisia kemiallisia reaktioita purkausputkimateriaalin (Al_2O_3) ja natriumin tai muiden purkausputken täytösaineiden kanssa. Elektrodien läheisyyteen syntyy tumma saostuma, joka voi muodostua alumiinista, natriumista, elektrodimateriaaleista sekä purkausputken läpivientien materiaaleista. Natriumin reagoidessa alumiinin kanssa syntyy natriumaluminaatteja, jotka aiheuttavat purkausputken seinämän muuttumisen harmaaksi putken

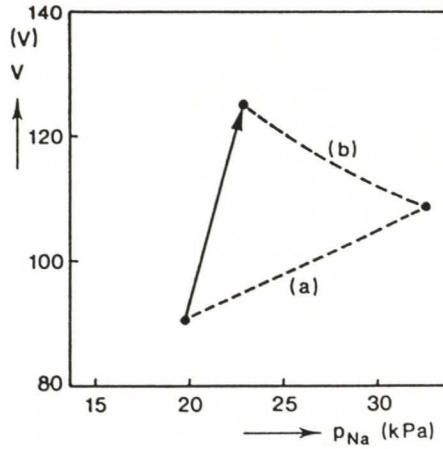
keskiosassa korkeimman lämpötilan alueilla. Muodostuvan natriumaluminaatin määrää voidaan pienentää pitämällä purkausputken seinän lämpötila alle 1400 K.

Natriumhävikin seurauksena purkausputkessa olevan amalgaamin koostumus muuttuu. Elohopean suhteellinen osuus amalgaamissa lisääntyy, jolloin elohopean höyrynpaine purkausputkessa nousee kylmäpisteen lämpötilan säilyessä muuttumattomana. Natriumin höyrynpaine purkausputkessa laskee. Elohopean höyrynpaineen kasvaessa nousee lamppujännite.

Edellä mainittujen kemiallisten reaktioiden lisäksi purkausputken tummumista aiheuttaa elektrodien kuluminen erityisesti lampun syttymisvaiheen aikana. Purkauksen alkuvaiheessa hohtopurkauksen aikana purkauksessa olevat ionit irroittavat elektrodien pinnasta atomeja liikemäärä- ja energiasiirtojen kautta. Seurauksena on elektrodien emissioaineen sekä elektrodimateriaalin kuluminen. Lisäksi suuri lamppuvirta sytytyksen aikana aiheuttaa emissioaineen ja elektrodimateriaalin höyrystymistä ja höyrystyneen aineen kulkeutumista purkausputken sisäpintaan.

Purkausputken tummuminen nostaa kylmäpisteen lämpötilaa, jolloin myös amalgaamin lämpötila nousee ja höyrynpaine purkausputkessa kasvaa. Seurauksena on lamppujännitteen kasvu.

Kuvassa 4.14 on esitetty suurpainenatriumlampun lamppujännitteen kasvu natriumin höyrynpaineen funktiona [29]. Amalgaamin lämpötilan noustessa kasvaa natriumin höyrynpaine, käyrä (a). Natriumhävikin seurauksena elohopean höyrynpaine kasvaa ja natriumin höyrynpaine pienenee, käyrä (b). Molemmat ilmiöt aiheuttavat lamppujännitteen kasvun.



Kuva 4.14 Lamppujännitteen V kasvu natriumin höyrynpaineen p_{Na} funktiona.

a = natriumin höyrynpaineen kasvu amalgaamin lämpötilan noustessa.

b = elohopean höyrynpaineen kasvu ja natriumin höyrynpaineen pieneneminen natriumhävikin seurauksena.

Värikorjatuilla suurpainenatriumlampuilla on lamppujännitteen kasvu purkausputken korkeammasta lämpötilasta johtuen voimakkaampaa kuin tavallisilla suurpainenatriumlampuilla. Purkausputken lämpötilan noustessa lisääntyvät sekä natriumhävikki että purkausputken tummuminen.

Elektrodien emissioaineen kuluminen aiheuttaa elektrodien jänniteputouksen kasvun sekä elektrodien päiden välisen purkauskaaren pitenemisen. Molemmat tekijät lisäävät lamppujännitteen kasvua. Elektrodiputouksen kasvun ja purkauskaaren pitenemisen vaikutus lamppujännitteen kasvuun on suurimmillaan noin 10 V.

Kun lamppujännite on kasvanut noin 150 %:iin alkuperäisestä arvostaan, ei kuiristin enää pysty pitämään lamppua toiminnassa ja lamppu sammuu. Lyhyen jäähtymisajan jälkeen höyrynpaineen laskettua lamppu syttyy uudelleen sammuen taas lamppujännitteen noustua em. arvoon. Tämä toistuu useita kertoja. Lamppu on saavuttanut elinikänsä lopun [29, 45, 52].

4.5.6 Valovirran muutokset polttoian aikana

Lampun valovirran alenema johtuu purkausputken ja ulkokuvun läpäisykyvyn huonontumisesta polttoian aikana.

Purkausputken tummumista tapahtuu lähinnä elektrodien lähistöllä emissio-aineen ja elektrodimateriaalin kulumisen sekä natriumhävikin seurauksena. Elektrodien kuluminen on sitä voimakkaampaa, mitä suurempi on lamppuvirta. Purkausputken keskiosa muuttuu harmaaksi natriumin reagoiessa purkausputkimateriaalin kanssa.

Purkausputkessa (Al_2O_3) olevan alumiinin sublimoitumisen seurauksena säteilyä absorboivaa alumiinia saostuu ulkokuvun sisäpintaan. Tämä aiheuttaa ulkokuvun läpäisykyvyn alenemisen. Alumiinin sublimoituminen lisääntyy purkausputken seinän lämpötilan noustessa. Safirista valmistetussa purkausputkessa sublimoituminen on vähäisempää.

Lamppujännitteen noususta johtuva lampputehon kasvu voi lampun eliniän alussa osittain korvata läpäisykyvyn huononemisesta johtuvan valovirran aleneman [30].

4.6 Yhteenveto

Monimetallilampun ja suurpainenatriumlampun valontuotto perustuu purkausputkessa tapahtuvaan korkeapaineiseen kaasupurkaukseen. Lamppujen toiminnan edellytyksenä on purkausputken kaasun saattaminen johtavaan tilaan ja sähkövirran kulku elektrodien välillä. Purkausputkessa olevan jalokaasun avulla alennetaan purkauksen syttymisjännitettä, joka korkeapaineisella purkauksella on kuitenkin niin suuri, että erillisen sytyttimen käyttö on välttämätöntä. Purkaus syttyy aluksi jalokaasussa. Metallien höyrynpaineen kasvaessa kasvaa myös virittyneiden metalliatomien määrä. Lämpenemisvaiheen loputtua saavutetaan lamppujen lopullinen toimintatila. Lämpenemiseen kuluva aika on monimetallilampuilla tyypillisesti noin 4 - 6 minuuttia ja värikorjatuilla suurpainenatriumlampuilla noin 5 - 10 minuuttia.

Korkeapaineisessa kaasupurkauksessa purkaus on keskittynyt purkausputken keskiosaan, jossa sijaitsee purkauksen kuumin kohta (5000-7000 K). Purkausputken alhaisin lämpötila (noin 1000 K) vallitsee putken seinämän lähellä. Lamppujen palaessa ei kaikki aine ole purkausputkessa höyrystyneenä, vaan sijaitsee tiivistyneenä purkausputken alhaisimman lämpötilan alueella ns. kylmäpisteessä. Kylmäpisteen lämpötila määrää valoa tuottavien aineiden höyrynpaineen purkausputkessa ja sitä kautta lamppujen valotekniset ominaisuudet.

Monimetallilamputta valoa tuottavina aineina ovat eri halogeeniyhdisteiden metalliatomit. Halogeenien spektriä ei synny, koska halogeenien viritysenergiat ovat suuria. Tavallisimmin käytetty halogeeni monimetallilamputta on jodi. Metallien halogeeniyhdisteiden höyrynpaineet ovat korkeampia kuin puhtaiden metallien samassa lämpötilassa. Purkausputken seinämän lähellä alhaisen lämpötilan alueilla metalliatomit yhdistyvät halogeeneihin. Tällöin metallit eivät pääse reagoimaan purkausputkimateriaalin kanssa.

Monimetallilamputta valoa tuottavina aineina voidaan käyttää useita eri metalleja. Kunkin metallin lähettämällä säteilyllä on tälle metallille ominainen spektri. Yhdistämällä sopivien metallien halogeeniyhdisteitä saadaan lampun spektristä halutunlainen. Eri metalleja sisältävien monimetallilamppujen valotekniset arvot poikkeavat huomattavastikin toisistaan.

Suurpainenatriumlampussa pääasiallinen valoa tuottava aine on natrium. Natriumin höyrynpaineen kasvaessa levenee purkauksen spektri. Värikorjatuissa suurpainenatriumlampuissa on natriumin höyrynpaine purkausputkessa noin 3-6-kertainen tavalliseen suurpainenatriumlamppuun verrattuna. Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen yleinen värintoistoindeksi $R_a = 60 - 85$.

Lamppuun syötetyn tehon jakautuminen riippuu mm. lampputyypistä, lamp-
putehosta sekä monimetallilampuilla käytetyistä metalliyhdisteistä ja suurpai-
nenatriumlampuilla mm. natriumin höyrynpaineesta. Näkyväksi säteilyksi
muuttuvan tehon osuus monimetallilampuilla on 20 - 35 % ja värikorjatuilla
suurpainenatriumlampuilla noin 20 - 30 %. Taulukkoon 4.1 on koottu eri metal-
liyhdisteitä sisältävien 400 W monimetallilamppujen sekä 400 W värikorjatun
suurpainenatriumlampun tehojakaumat, kun tarkastelu suoritetaan lampun ul-
kokuvun seinämämän läpäisemänä teho-osuuksina. Lisäksi on esitetty kunkin
lampun valotehokkuus. Valotehokkuuksien arvoissa ei ole huomioitu liitäntä-
laitteiden tehonkulutusta. Suurin näkyväksi valoksi muuttuva teho-osuus on
skandiumpohjaisella monimetallilampulla, jonka valotehokkuus on myös suu-
rin. Värikorjatulla suurpainenatriumlampulla on tarkastelluista lampuista suu-
rin infrapunasäteilyn osuus. Värikorjatun suurpainenatriumlampun säteily ei
sisällä UV-säteilyä.

Taulukko 4.1 Eri metalliyhdisteitä sisältävien 400 W monimetallilamppujen sekä 400 W värikorjatun suurpainenatriumlampun ($R_a = 85$) tehon jakautuminen tarkasteltuna ulkokuvun seinämän läpäisemänä teho-osuuksina. Ulkokuvun kautta lampusta poistuva häviöteho sekä UV-säteilyksi, näkyväksi valoksi ja IP-säteilyksi muuttuva tehon osuus on esitetty sekä tehoyksiköissä (W) että prosentteina lampun kokonaistehosta (%). Lisäksi on esitetty lampun valotehokkuus.

Lamppu- tyyppi	Häviöt ulkokuvulla	UV-säteily	Näkyvä valo	IP-säteily	Valo- tehokkuus η lm/W
1.	200 W / 50 %	6 W / 1.5 %	96 W / 24 %	98 W / 24.5 %	87
2.	212 W / 53 %	14 W / 3.5 %	136 W / 34 %	38 W / 9.5 %	97
3.	160 W / 40 %	8 W / 2 %	128 W / 32 %	104 W / 26 %	81
4.	196 W / 49 %	4 W / 1 %	92 W / 23 %	108 W / 27 %	60
5.	156 W / 39 %	-	124 W / 31 %	120 W / 30 %	72

Lampputyyppi 1. = Na-Tl-In-monimetallilamppu

Lampputyyppi 2. = Sc-pohjainen monimetallilamppu

Lampputyyppi 3. = Dy-pohjainen monimetallilamppu

Lampputyyppi 4. = Sn-pohjainen monimetallilamppu

Lampputyyppi 5. = värikorjattu suurpainenatriumlamppu.

Suurpainenatriumlampulle on ominaista lampun eliniän aikana tapahtuva lampujännitteen kasvu. Tämä johtuu purkausputkessa tapahtuvasta natriumhävikistä sekä purkausputken tummumisen aiheuttamasta höyrönpaineen kasvusta. Lampun eliniän aikana tapahtuva lampujännitteen kasvu on värikorjatuilla suurpainenatriumlampuilla voimakkaampaa kuin tavallisilla suurpainenatriumlampuilla. Kun lampujännite on kasvanut noin 150 % :iin alkuperäisestä arvostaan, ei kuristin enää pysty pitämään lampua toiminnassa ja lamppu sammuu.

Lamppujen valovirran alenema eliniän aikana johtuu lähinnä purkausputken läpäisykyvyn huonontumisesta tummumisen johdosta. Tummumista tapahtuu pääasiassa elektrodien lähistöllä elektrodimateriaalin höyrystymisen seurauksena. Elektrodien höyrystyminen on voimakkainta lampun syttymisvaiheen aikana.

5. Ulkoisten tekijöiden vaikutus lamppujen toimintaan

5.1 Verkkojännitevaihtelut ja jännitekatkokset

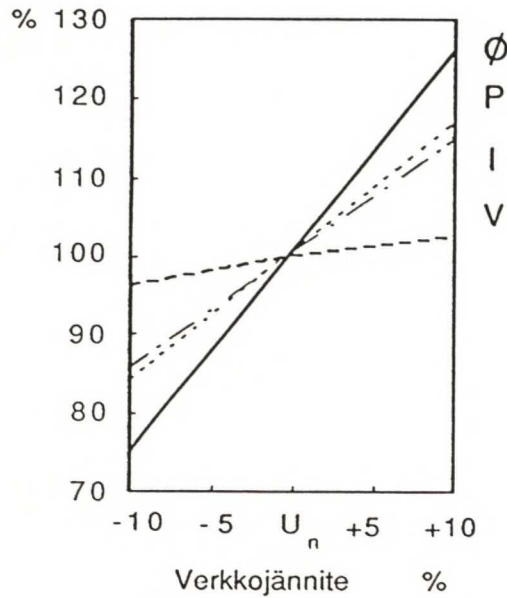
5.1.1 Yleistä

Verkkojännitevaihtelut aiheuttavat muutoksia monimetallilamppujen ja suurpainenatriumlamppujen sähköisissä arvoissa ja valontuotossa. Verkkojännitevaihteluiden seurauksena liitäntälaitteena käytetyn kuristimen yli oleva jännite muuttuu, jolloin myös lamppuvirta muuttuu. Tämä aiheuttaa muutoksia lampputehossa. Lampputehon muutoksesta on seurauksena purkausputken höyrynpaineen muuttuminen. Purkausputkessa vallitseva täytösaineiden höyrynpaine puolestaan määrää lamppujännitteen suuruuden. Lampputehomuutokset aiheuttavat lisäksi muutoksia lampun valovirrassa [29].

5.1.2 Monimetallilamput

Monimetallilampun lamppujännitteen suuruuden määrää pääasiassa purkausputkessa olevan elohopean höyrynpaine. Koska kaikki elohopea on lampun toiminnan aikana höyrystyneenä, ovat muutokset elohopean höyrynpaineessa ja siten lamppujännitteessä yleensä normaaleista verkkojännitevaihteluista huolimatta pieniä. Verkkojännitevaihteluiden aiheuttamasta lampputehon muutoksesta on kuitenkin seurauksena lampun valovirran muuttuminen.

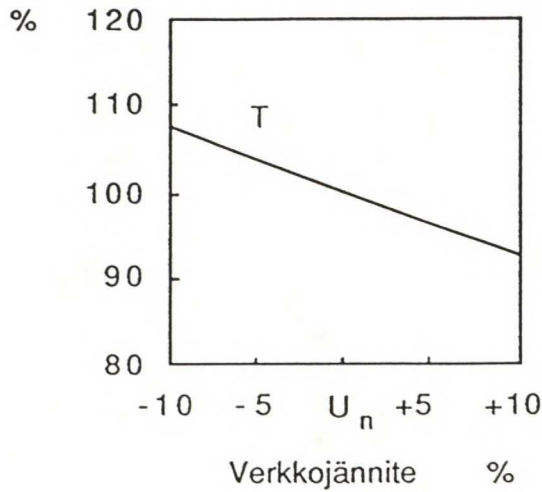
Kuvassa 5.1 on esitetty erään monimetallilampun lamppujännitteen, lamppuvirran, lampputehon sekä valovirran muuttuminen verkkojännitevaihteluiden funktiona [29]. Verkkojännitteen poiketessa nimellisarvostaan ovat lamppujännitteen muutokset suhteellisen pieniä, kun taas muutokset lamppuvirrassa ja siten myös lampputehossa sekä valovirrassa ovat huomattavia.



Kuva 5.1 Monimetallilampun lamppujännitteen V , lamppuvirran I , lampputehon P sekä valovirran ϕ muuttuminen verkkajännitevaihteluiden seurauksena.

Verkkajännitteen kasvusta on seurauksena lamppuvirran kasvu. Lamppuvirran kasvaessa lisääntyy elektrodimateriaalin höyrystyminen ja tästä johtuva purkausputken tummuminen. Jatkuva ylijännite kiihdyttää siten valovirran alenemaa ja alentaa lampun polttoikää.

Verkkajännitevaihtelut voivat myös aiheuttaa monimetallilampun väriominaisuuksien muuttumista. Tämä johtuu purkausputken lämpötilan muutoksien aiheuttamista muutoksista purkaukseen osallistuvien aineiden höyrönpaineen koostumuksessa. Verkkajännitevaihteluiden aiheuttamien värimuutoksien esiintyminen ja niiden suuruus riippuvat purkausputkessa käytetyistä metalliyhdisteistä. Kuvassa 5.2 on esitetty erään dysprosium-pohjaisen monimetallilampun värilämpötilan muuttuminen verkkajännitevaihteluiden seurauksena [29]. Lampun värilämpötila nousee verkkajännitteen ollessa nimellisarvoaan pienempi.



Kuva 5.2 Dysprosium-pohjaisen monimetallilampun värilämpötilan T muuttuminen verkkojännitevaihteluiden seurauksena.

Monimetallilampun käyttäytyminen syöttöjännitteessä tapahtuvissa jännitekatkoksissa riippuu mm. lampputyypistä sekä katkoksen kestosta. Käytännössä pienjänniteverkossa tapahtuvat lyhyimmät pikajälleenkytkennöistä aiheutuvat jännitekatkokset kestävät useita satoja millisekunteja. Näiden katkosten aikana monimetallilamppu sammuu aina.

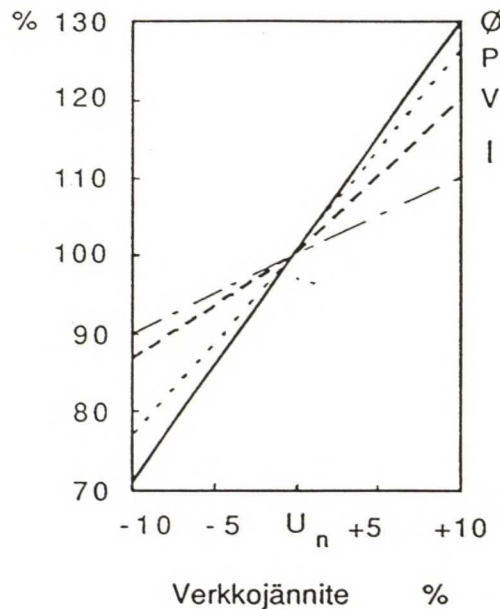
Verkkojännitteessä tapahtuvat äkilliset jännitetason putoamiset ovat ongelmallisia monimetallilampun kannalta. Mikäli verkkojännite laskee äkillisesti sellaiselle tasolle, ettei se enää ole riittävä purkauksen uudelleensyttymiseen virran nollakohdan jälkeen puolijakson alussa, on seurauksena lampun sammuminen. Jopa 5 ... 10 % suuruinen äkillinen jännitetason putoaminen voi aiheuttaa lampun sammumisen [29]. Tällaisen jännitetason putoamisen saattaa aiheuttaa esimerkiksi suuren kuorman kytkeminen verkkoon.

Monimetallilampun sammuttua ei sen jälleensyttyminen ole heti mahdollista, koska purkausputken korkeasta höyrynpaineesta johtuen ei lampun normaali syttymisjännite ole riittävä lampun sytyttämiseen. Lamppu vaatii jäähtymisajan, jonka aikana höyrynpaine purkausputkessa laskee sellaiselle tasolle, että jälleensyttyminen on mahdollista. Tarvittava jäähtymisaika vaihtelee lampputyypistä ja -tehosta riippuen muutamasta minuutista noin kymmeneen minuuttiin. Jäähtymisaikaan voi vaikuttaa myös valaisimen rakenne. Poikkeuksen muodostavat lamput, jotka on varustettu välittömän jälleensyttymisen mahdollistavalla sytytyslaitteella. Tämän sytytyslaitteen antama useiden kymmenien

kilovolttien sytytysjännite takaa myös kuuman lampun syttymisen. Kaikkia monimetallilampputyyppejä ei kuitenkaan lamppujen rakenteen vuoksi voida varustaa näin suuren syttymisjännitteen antavalla sytytyslaitteella [29].

5.1.3 Suurpainenatriumlamput

Suurpainenatriumlampun lamppujännitteen määrää purkausputkessa olevan elohopean höyrynpaineen ohella natriumin höyrynpaine. Lampun palaessa on purkausputkessa aina höyrystymätöntä elohopeaa ja natriumia amalgaami-seoksena purkausputken alhaisimman lämpötilan alueella ns. kylmäpisteessä. Lampputehon muuttuessa muuttuu kylmäpisteiden lämpötila, josta on seurauksena purkausputken höyrynpaineen ja siten myös lamppujännitteen muuttuminen. Höyrystymättömästä amalgaamista johtuen ovat verkkojännitevaihteluiden aiheuttamat lamppujännitteen muutokset suurpainenatriumlampulla suurempia kuin monimetallilampulla. Kuvassa 5.3 on esitetty tyypillinen suurpainenatriumlampun lamppujännitteen, lamppuvirran, lampputehon sekä lampun valovirran muuttuminen verkkojännitevaihteluiden seurauksena [29].



Kuva 5.3 Suurpainenatriumlampun lamppujännitteen V , lamppuvirran I , lampputehon P sekä valovirran ϕ muutokset verkkojännitevaihteluiden seurauksena.

Syöttöjännitteen ollessa nimellisarvoaan suurempi kasvavat sekä lamppuvirta että lamppujännite. Lamppuvirran kasvaminen lisää elektrodien kulumisesta

johtuvaa purkausputken tummumista. Tästä johtuen jatkuva ylijännite verkkojännitteessä nopeuttaa valovirran alenemaa ja alentaa lampun elinikää. Koska suurpainenatriumlampulle on ominaista eliniän aikana tapahtuva lamppujännitteen kasvu (luku 4.5.5), voi pienikin ylijännite eliniän loppuvaiheessa nostaa lamppujännitettä niin, että seurauksena on lampun sammuminen.

Suurpainenatriumlampun käyttäytyminen verkkojännitekatkoksissa ja äkillisissä jännitetason putoamisissa on hyvin samanlaista kuin monimetallilampun. Käytännössä verkkojännitteessä tapahtuvat katkokset ovat riittävän pitkiä sammuttamaan lampun. Samoin tapahtuu useissa verkkojännitteessä tapahtuvissa äkillisissä jännitetason putoamisissa.

Suurpainenatriumlampun herkkyys verkkojännitteen jännitetason putoamisille lisääntyy lampun eliniän loppuvaiheessa. Tähän on syynä lampun eliniän aikana tapahtuva lamppujännitteen kasvu. Äkillisen verkkojännitepudotuksen seurauksena lamppujännite nousee aluksi kaasupurkauksen negatiivisesta virta/jännite-käyrästä johtuen. Lampun eliniän lopulla lamppujännite saattaa hetkellisesti nousta niin suureksi, ettei verkkojännite enää ole riittävän suuri purkauksen puolijakson alussa tapahtuvaan uudelleensyttymiseen. Tällöin lamppu sammuu.

Sammuneen suurpainenatriumlampun jälleensyttyminen ei ole heti mahdollista purkausputken korkeasta höyrynpaineesta johtuen. Lampun on saatava jäähtyä ennen kuin jälleensyttyminen on mahdollista. Tarvittava jäähtymisaika riippuu lampputyypistä ja -tehosta ollen tyypillisesti 1...5 minuuttia. Jäähtymisaikaan voi vaikuttaa myös valaisimen rakenne. Myös tietyt suurpainenatriumlamputyypit voidaan varustaa kuumen lampun jälleensyttymisen mahdollistavalla suurjännitesytyttimellä. Ainoastaan kaksikantaisten lamppujen rakenne kestää tarvittavan useiden kymmenien kilovolttien sytytysjännitteen, joten kyseeseen tulevat vain tavalliset suurpainenatriumlamput [30].

5.2 Ympäristön lämpötila

5.2.1 Monimetallilamput

Koska monimetallilampun toimintalämpötila on hyvin korkea ja erikoiskäyttölamppuja lukuunottamatta purkausputken ympärillä on ulkokupu, on ympäristön lämpötilan vaikutus lampun toimintaan vähäistä. Ulkoisen lämpötilan vaikutuksista monimetallilampun toimintaan ei kuitenkaan ole saatavilla tutkimustuloksia.

Monimetallilampuille määritellään korkeimmat sallitut ulkokuvun ja kannan lämpötilat. Ympäristön lämpötilan vaikutus näihin lämpötiloihin on kuitenkin suhteellisen vähäinen, sen sijaan valaisimen rakennne vaikuttaa lämpötasapainoon suuresti. Tästä enemmän luvussa 5.4.1. Liitäntälaitteiden lämpötilakesoisuus on huomattavasti alhaisempi kuin lamppujen. Elektronisissa sytyttimissä olevat puolijohdekomponentit ja magneettiset materiaalit ovat herkkiä erityisesti korkeille lämpötiloille. Valmistajat ilmoittavat sytyttimille sallitun lämpötila-alueen, joka on tyypillisesti $-20 \dots +80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kuristimen käämin korkein sallittu lämpötila on $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ [29].

Suomen oloissa ei monimetallilamppujen syttymisessä ulkotiloissa ole havaittu ongelmia [53, 54]. Lamput syttyvät yleensä moitteettomasti noin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa, tietyt lampputyypit syttyvät vielä $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ulkoisessa lämpötilassa.

5.2.2 Suurpainenatriumlamput

Korkeasta toimintalämpötilasta ja purkausputken ympärillä olevasta ulkokuvusta johtuen on ulkoisen lämpötilan vaikutus suurpainenatriumlampun toimintaan vähäistä. Ympäristön lämpötilan vaikutus lampun valontuottoon ja valon väriominaisuuksiin on merkityksetön normaaleilla lämpötilan vaihtelualueilla. Ulkoisen lämpötilan vaikutuksesta värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen toimintaan ei ole olemassa tutkimustuloksia. Ulkoisen lämpötilan vaikutuksen värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen toimintaan voidaan teorian mukaan kuitenkin olettaa olevan yhtä vähäisen kuin tavallisten suurpainenatriumlamppujen kohdalla.

Samoin kuin monimetallilampuille määritellään suurpainenatriumlampuille korkeimmat sallitut kannan ja ulkokuvun lämpötilat. Käytännössä ympäristön

lämpötilan vaikutus näihin lämpötiloihin on kuitenkin vähäinen, sen sijaan valaisimen rakenteella on näihin lämpötiloihin suuri vaikutus. Tästä enemmän luvussa 5.4.2. Sytyttimien lämpöherkkien komponenttien takia sytyttimien sallittu lämpötila-alue on yleensä $-20 \dots +80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kuristimen käämin korkein sallittu lämpötila on $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ [29].

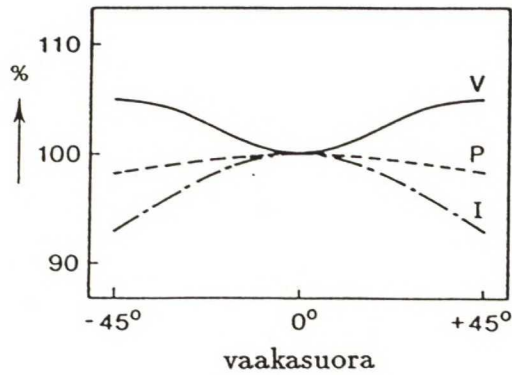
Ulkoisen lämpötilan laskeminen ei tuota ongelmaa suurpainenatriumlamppujen syttymiselle. Suurpainenatriumlamput syttyvät moitteettomasti jopa $-30\dots-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa [36].

5.3 Polttoasento

5.3.1 Monimetallilamput

Monimetallilamput polttoasennon muuttuessa muuttuu purkausputken lämpötasapaino. Purkausputken lämpötilan muutokset aiheuttavat muutoksia lamputta sähköisissä suureissa ja valovirrassa. Kukin lamppu suunnitellaan toimimaan tietyssä polttoasennossa. Valmistajat ilmoittavat lamputta varten polttoasennon vaihtelurajoinen. Poikkeuksen muodostavat tietyt lamputyypit, joiden polttoasento on vapaa. Tästä esimerkkinä pienitehoiset ($35 - 150\text{ W}$) erikoiskannalla varustetut yksikantalamput (luku 3.1.7.2), joiden purkausputken muoto poikkeaa muiden monimetallilamppujen purkausputkesta.

Kuvassa 5.4 on esitetty erään monimetallilamputta lamputta jännitteen , lamputta virran sekä lamputta tehon muuttuminen lamputta polttoasennon poiketessa $\pm 45^{\circ}$ vaakasuorasta (0°) asennosta [29]. Polttoasennon poiketessa vaakasuorasta aiheuttaa purkausputken lämpötilan muuttuminen muutoksia lamputta jännitteessä ja siten myös lamputta tehossa ja -virrassa.



Kuva 5.4 Erään monimetallilampun lamppujännite V, lamppuvirta I ja lamp-
puteho P lampun polttoasennon poiketessa vaakasuorasta.

Polttoasennon muuttuminen voi aiheuttaa myös purkausputkessa olevien eri täytösaineiden erottumista, jolloin aineiden sijainti purkauskäärän eri osissa ei ole enää tasaista. Tästä on seurauksena värieroja purkauskäärässä [29].

5.3.2 Suurpainenatriumlamput

Suurpainenatriumlampun lämpötasapaino ei ole herkkä lampun polttoasen-
nolle. Purkausputken kylmäpisteen lämpötilan muutokset eivät ole suuria polt-
toasennon muuttuessa. Lampun polttoasento on vapaa.

5.4 Valaisimen rakenne

5.4.1 Monimetallilamput

Valaisin luo pitkälti lampun toimintaolosuhteet. Koska suuri osuus lamppuun
syötetystä tehosta muuttuu lämmöksi, vaikuttaa valaisimen rakenne osaltaan
purkausputken lämpötilaan. Mikäli liian suuri osuus tästä lämmöstä jää valai-
simen sisälle nousee purkausputken lämpötila optimiarvoaan suuremmaksi.

Valaisinsuunnittelussa on otettava huomioon lampun oikean toiminnan takaava
lämpötasapaino. Lamppujännite voi valaisimessa olla jopa 10 % suurempi kuin

lampun palaessa vapaassa tilassa. Tämä johtuu lampun ympäristön suuremmasta lämpötilasta sen ollessa sijoitettuna suljettuun valaisimeen. Lamppujännitteen kasvusta on seurauksena lampun eliniän lyheneminen sekä mahdollisesti valon väriominaisuuksien muuttuminen [37].

Valaisimen heijastimet on muotoiltava siten, että säteilyn heijastuminen takaisin purkausputkeen on mahdollisimman vähäistä. Purkausputkeen takaisin heijastunut säteily lisää purkausputken tummumista, mistä on seurauksena valovirran aleneman ohella lamppujännitteen kasvu [37].

Valaisimeen sijoitetulle lampulle määritellään korkeimmat sallitut lampun kannan ja ulkokuvun lämpötilat. Liian korkeat kannan ja ulkokuvun lämpötilat voivat aiheuttaa lasin pehmenemisestä johtuvia muutoksia lampun toiminnassa, purkausputken vaurioitumista ulkokuvusta vapautuneen kosteuden johdosta, kannan kitin pehmenemistä sekä kannan tai läpivientijohtimien korroosiota. Monimetallilampun suurin sallittu kannan lämpötila on välillä noin 210 - 300 °C kannan tyypistä ja lampputyypistä riippuen. Ulkokuvun suurin sallittu lämpötila on ellipsoidin muotoisella kuvulla 250 - 1000 W lampuilla 350 - 450 °C ja sylinterin muotoisella kuvulla 400 - 2000 W lampuilla 600 °C. Kaksikantaisen lampun (vrt. luku 3.1.7.2) ulkokuvun suurin sallittu lämpötila on 70 W lampulle 500 °C ja 150 W sekä 250 W lampuille 650 °C. Määritettäessä lampun kannalle ja ulkokuvulle tulevaa suurinta lämpötilarastitusta, tulee valaisimen olla lämpötilan nousun kannalta kaikkein epäedullisimmassa asennossa [37, 55].

Kaksikantaisille monimetallilampuille (vrt. luku 3.1.7.2) on ominaista purkauskaareen syntyvät eri väriyöhykkeet. Oikealla valaisimen heijastinmateriaalin valinnalla saadaan kokonaissäteilyn värivaikutelma yksikäsitteiseksi. Tällaisena heijastimena toimii esimerkiksi vasarrettu alumiinilevy, joka sekoittaa purkauskaaren eri väriyöhykkeistä tulevan säteilyn [56]. Näiden lamppujen samoin kuin pienitehoisten erikoiskannalla varustettujen yksikantaisten monimetallilamppujen käytön yhteydessä on myös huomattava, että lamppujen kvartsilasia oleva ulkokupu läpäisee UV-säteilyä. Valaisimissa on käytettävä UV-säteilyä absorboivaa suojalasia.

Pienitehoiset (70 - 250 W) kaksikantaiset monimetallilamput on suunniteltu siten, että niitä on poltettava aina valaisimessa, sillä muuten ne eivät saavuta oikeata toimintalämpötilaa ja -painetta. Lamppujen ulkoinen lämpötila valaisimessa on noin 150 °C [37].

5.4.2 Suurpainenatriumlamput

Valaisimen rakenne voi vaikuttaa huomattavastikin suurpainenatriumlampun sähköisiin arvoihin. Näin käy siinä tapauksessa, että valaisimen heijastin heijastaa säteilyn takaisin purkausputkeen. Tällöin purkausputken lämpötila kohoaa ja purkausputken kylmäpisteen lämpötilan kasvaessa höyrynpaine ja siten myös lamppujännite nousee. Lamppujännite voi valaisimessa olla jopa 10 % suurempi kuin lampun palaessa vapaassa tilassa. Liiallinen lamppujännitteen kasvu lyhentää lampun elinikää [29].

Suurpainenatriumppuja koskeissa standardeissa määritellään suurin sallittu lamppujännitteen kasvu kun lamppu siirretään vapaasta tilasta valaisimeen lampun palaessa referenssikuristimellaan nimellisjännitteellä [47].

Lamppustandardissa määritellään suurpainenatriumlampun kannan suurimmaksi sallituksi lämpötilaksi 210 - 250 °C ja ulkokuvun suurimmaksi sallituksi lämpötilaksi 400 °C. Koska nämä lämpötilat määräytyvät käytettyjen materiaalien lämpötilakestoisuuden perusteella, on huomattava, että mikäli valaisimen rakenteesta johtuen lämpötilat saavuttavat annetut arvot voi seurauksena olla lamppujännitteen kasvu yli standardeissa annettujen arvojen [47].

5.5 Valovirran säätäminen

5.5.1 Monimetallilamput

Lamppujen tehon ja valovirran säätö perustuu lamppuvirran säätämiseen. Monimetallilampun valovirran säätö voidaan periaatteessa toteuttaa useammalla eri tavalla [57].

Säädettävien muuntajien avulla pienennetään kuorman jännitteen amplitudia. Sarjakuristinsäädössä lamppuvirtaa pienennetään impedanssia suurentamalla.

Tyristoreilla ja triaceilla toteutetuilla säätimillä leikataan vaihejännitteestä osa pois sytyttämällä komponentit tietyn ajan kuluttua jännitteen nollakohdasta.

Tyristoreilla ja triaceilla toteutetut vaihekulmasäätimet eivät kuitenkaan sovellu rinnakkaiskompensoitujen lamppujen tehonsäätöön, sillä kompensointikondensaattorien kytkimien liipaisuhetkellä ottamat suuret virrat saattavat tuhota kytkinelementit.

Transistorisäätimen periaatteena on katkaista kuormalle menevä jännite tietyn ajan kuluttua jännitteen nollakohdasta. Tilanne on tavalliselle ohjauskulmasäädölle käänteinen. Transistorisäätimellä voidaan säätää myös rinnakkaiskompensoituja lamppeja.

Monimetallilampun tehon säätämisen on tapahduttava hitaasti. Liian nopea säätö voi aiheuttaa lampun sammumisen. Säätimessä on oltava aikaviivästys. Lampun syttymis- ja lämpenemisvaiheessa ei säätöä tule suorittaa [57].

Monimetallilamppu ei parhaalla mahdollisella tavalla sovellu säädinkäyttöön johtuen valon värin voimakkaista muutoksista valovirtaa säädettäessä. Lampputehon muutokset aiheuttavat muutoksia purkausputken lämpötilassa. Tällöin valoa tuottavien aineiden höyrynpaineen koostumus purkausputkessa muuttuu, mistä on seurauksena muutoksia valon värissä. Kun lampun valovirta on noin 60 % nimellisarvostaan alkaa säteilylle olla ominaista elohopeapurkaukselle tyypillinen sini-vihreä väri. Tämä lampun säteilyn sini-vihreä väri alkaa olla varsin hallitseva valovirran ollessa alle 40 % nimellisarvostaan. Monimetallilampun valon värin muuttuminen valovirtaa säädettäessä on kuitenkin erilaista eri lampputyypeille riippuen purkausputkessa käytetyistä metalliyhdisteistä [55]. Luvussa 8.2.2 on tämän työn yhteydessä suoritettuihin mittauksiin perustuen tarkasteltu eri metalliyhdisteitä sisältävien monimetallilamppujen väriominaisuuksien muuttumista syöttöjännitettä säädettäessä.

Lamppuvalmistajat eivät aina suosittele monimetallilamppujen valovirran säätämistä johtuen juuri värimuutoksien aiheuttamasta valon värintoisto-ominaisuuksien huononemisesta.

Monimetallilampun valovirran säätöalue on rajallinen. Pitkäaikaisessa poltossa suositellaan yleensä lampun eliniän kannalta valovirran säätöalueeksi 50 - 100 %. Usein ei valovirran säätö kuitenkaan näinkään alhaisille valotasoilte ole mielekästä valon värimuutoksista johtuen [57].

Monimetallilamppujen soveltuvuus säädinkäyttöön riippuu myös käytetyistä lamppujen liitäntälaitteista. Esimerkiksi elektronisella liitäntälaitteella varustettu 32 W DC-käyttöinen monimetallilamppu (luku 3.1.7.3) ei sovellu säädinkäyttöön elektronisesta liitäntälaitteesta johtuen.

5.5.2 Suurpainenatriumlamput

Suurpainenatriumlampun valovirran säätö voidaan toteuttaa samoilla periaatteilla kuin monimetallilampun. Säätötapoja ovat sarjakuristinsäätö, säätömuuntajan avulla tapahtuva säätö sekä elektronisin komponentein toteutettu vaihekulmasäätö [57].

Suurpainenatriumlamppu soveltuu säädinkäyttöön monimetallilamppua paremmin. Tavallisen suurpainenatriumlampun valovirran säätöalue on nykyisillä laitteilla parhaimmillaan 35 - 100 %. Pitkäaikaisessa käytössä suositellaan säätöalueeksi lampun eliniän kannalta kuitenkin 50 - 100 %.

Myös suurpainenatriumlampun säädön on tapahduttava hitaasti, sillä liian nopea säätö aiheuttaa lampun sammumisen. Tästä johtuen on säätimessä oltava aikaviivästys. Lampun syttymis- ja lämpenemisvaiheessa ei säätöä tule suorittaa.

Huolimatta purkausputken lämpötilan alenemisesta suurpainenatriumlampun valon väriominaisuudet säilyvät yleensä suhteellisen muuttumattomina noin 50 - 60 %:n valovirtaan asti. Valovirran laskiessa alle 50 % nimellisarvostaan alkaa valon väriä hallita pienpaineiselle natriumpurkaukselle tyypillinen keltainen säteily [55].

Värikorjatun suurpainenatriumlampun valovirran säätö ei säätöteknisesti poikkea tavallisen suurpainenatriumlampun säädöstä. Lampun tehoa ja valovirtaa pienennettäessä laskee höyrynpaine purkausputkessa. Tällöin lampun värilämpötila ja värintoistoindeksi laskevat valon värin alkaessa yhä enemmän muistuttaa tavallisen suurpainenatriumlampun valoa. Värikorjatun suurpainenatriumlampun väriominaisuuksien muutosten suuruus riippuu lampun värintoistoindeksistä ($R_a = 60-65 / 80-85$). Taulukossa 5.1 on esitetty erään 150 W värikorjatun suurpainenatriumlampun ($R_a = 85$) lamppujännitteen, värintoistoindeksin ja värilämpötilan muutokset syöttöjännitettä säädettäessä. Värintoistoindeksin $R_a = 60 - 65$ omaavien värikorjattujen suurpainenatriumlampujen väriominaisuuksien suhteelliset muutokset ovat taulukossa 5.1 käsiteltyä lamppua pienemmät.

Taulukko 5.1 Erään 150 W värikorjatun suurpainenatriumlampun ($R_a = 85$) lamppujännitteen V , värintoistoindeksin R_a ja värilämpötilan T muutokset syöttöjännitettä U säädettäessä.

U/V	V/V	R_a	T/K
180	55	20	1950
190	61	28	1950
200	88	62	2300
210	103	79	2400
220	110	86	2500
230	119	87	2550
240	128	82	2650

Luvussa 8.2.2 on tehtyihin mittauksiin perustuen tarkasteltu värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen väriominaisuuksien muuttumista syöttöjännitettä säädettäessä.

Myös värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen soveltuvuus säädinkäyttöön riippuu käytetyistä lamppujen liitäntälaitteista. Markkinoilla olevat 35 - 100 W värikorjatut suurpainenatriumlamput (luku 3.2.7.2) eivät sovellu säädinkäyttöön lamppujen sytytinlaitteen sisältämän elektronisen tehon stabilointipiirin johdosta.

5.6 Yhteenveto

Monimetallilamput ja suurpainenatriumlamput ovat suhteellisen herkkiä verkkojännitevaihteluille. Verkkojännitevaihtelut aiheuttavat muutoksia lamppujen sähköisissä suureissa ja valontuotossa. Jotta lamppujen toiminta olisi luotettavaa ja valontuotto halutunlaista, tulisi verkkojännitteen pysyä alueella $\pm 5\%$ nimellisjännitteestä.

Verkossa tapahtuvien jännitekatkosten seurauksena monimetallilamput ja suurpainenatriumlamput sammuvat. Myös äkilliset jännitetason putoamiset voivat sammuttaa lamput. Suurpainenatriumlampun herkkyyys verkkojännitteen jännitetason putoamisille lisääntyy lampun eliniän loppuvaiheessa. Sammuttuaan lamput vaativat jäähtymisajan, joka lampputyypistä ja -tehosta riippuen on monimetallilampuilla muutamasta minuutista noin kymmeneen minuuttiin ja suurpainenatriumlampuilla 1...5 minuuttia. Poikkeuksen muodostavat lamput, jotka voidaan varustaa välittömän jälleensyttymisen mahdollistavalla sytytyslaitteella.

Lamppujen korkeasta toimintalämpötilasta ja purkausputken ympärillä olevasta ulkokuvusta johtuen ulkoisen lämpötilan vaikutus lamppujen toimintaan on vähäistä. Liitälaitteiden lämpötilakestoisuudet ovat huomattavasti alhaisempia kuin lamppujen. Suomen oloissa ei lamppujen syttymisessä ulkotiloissa ole havaittu ongelmia.

Valmistajat ilmoittavat monimetallilampuille polttoasennon vaihtelurajoihin. Poikkeaminen tästä polttoasennosta aiheuttaa muutoksia purkausputken lämpötasapainossa, mistä seuraa muutoksia lampun valovirrassa ja sähköisissä suureissa. Suurpainenatriumlampun polttoasento on vapaa.

Valaisin luo pitkälti lamppujen toimintaolosuhteet. Valaisinsuunnittelussa on otettava huomioon lamppujen oikean toiminnan takaava lämpötasapaino. Lamppujännite voi valaisimessa olla jopa 10 % suurempi kuin lampun palaessa vapaassa tilassa. Liiallinen lamppujännitteen kasvu lyhentää lampun elinikää.

Monimetallilamppujen ja suurpainenatriumlamppujen valovirran säätö voidaan toteuttaa useammalla eri periaatteella. Säätimissä on oltava aikaviivästys, sillä liian nopea säätö aiheuttaa lamppujen sammumisen. Monimetallilamppu ei kuitenkaan parhaalla mahdollisella tavalla sovellu säädinkäyttöön johtuen voimakkaista valon värin muutoksista valovirtaa säädettyä. Suurpainenatriumlampun valon väriominaisuudet säilyvät yleensä suhteellisen muuttumattomina

noin 50 - 60 %:n valovirtaan asti. Värikorjatun suurpainenatriumlampun väriominaisuudet muuttuvat valovirran laskiessa. Väriominaisuuksien muutosten suuruus riippuu lampun värintoistoindeksistä ($R_a = 60 / 85$). Värikorjatun suurpainenatriumlampun tehon laskiessa lampun värintoistoindeksi ja värilämpötila laskevat, jolloin valon väri alkaa yhä enemmän muistuttaa tavallisen suurpainenatriumlampun keltaista valoa.

6. UV-säteily

6.1 Yleistä

Ultraviolettisäteily (UV-säteily) on silmälle näkymätöntä sähkömagneettista säteilyä. UV-säteily sijoittuu spektrin lyhytaaltoiselle alueelle näkyvän valon ulkopuolelle. UV-säteily jaetaan aallonpituuksien mukaan kolmeen ryhmään: UV-A 315 - 400 nm, UV-B 280 - 315 nm ja UV-C 100 - 280 nm.

UV-säteilyä esiintyy luonnossa yhdessä runsaan näkyvän valon kanssa. Auringon säteilemästä energiasta noin 10 % on UV-säteilyn alueella. Kaikki auringon UV-säteily ei kuitenkaan saavu maahan asti. Maahan saapuvan UV-säteilyn määrä ja koostumus riippuu mm. auringon korkeudesta, tarkastelupisteen korkeudesta merenpinnasta, ilman epäpuhtauksista ja otsonipitoisuudesta sekä ilman kosteudesta ja pilvisyydestä. UV-C-säteily absorboituu täysin ilmakehään.

UV-säteilyä esiintyy myös erilaisten keinotekoisien valonlähteiden tuottamassa säteilyssä. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on yli 2500 K säteilevät UV-säteilyä [58].

6.2 Biologisia vaikutuksia

Suurin osa UV-säteilyn vaikutuksista ihmisellä kohdistuu ihoon ja silmiin.

UV-säteily ei aiheuta silmässä näkemisreaktiota, vaan muita vaikutuksia, jotka ovat yleensä haitallisia silmälle. UV-C- ja UV-B- säteily absorboituvat lähes kokonaan silmän sarveis- ja sidekalvoon näkyvän valon kulkeutuessa silmän linssin läpi verkkokalvolle. Silmän sarveis- ja sidekalvoihin voi UV-säteilyn ansiosta syntyä tulehduksia. Sidekalvon tulehduksen yhteydessä ilmenee usein kasvojen ja silmäluomien punetumista. Oireita ovat myös silmien kirvely, turvotus sekä runsas kyynelvuoto.

Osa UV-A-säteilystä sekä UV-B-säteily absorboituvat silmän linssiin. Linssivauriot ilmenevät linssin samenessena. Lyhytaikaisen säteilyaltistumisen aiheuttama linssisamentuma voi kestää muutamia päiviä ja palautua sen jälkeen

ennalleen. Toistuvat krooniset säteilyaltistumiset aiheuttavat vähitellen harmaakaihin kehittymisen linssissä.

Lyhytaaltainen säteily aiheuttaa ihon punoitusta. Punoitusta aiheuttavat UV-B- ja UV-C-säteily, mutta myös UV-A-säteily suurina annoksina. Ihon punoitus on lääketieteelliseltä nimeltään eryteema. Voimakkaaseen punoitukseen liittyy tulehdus ja ihon kesiminen. Tämän jälkeen seuraa ruskettuminen.

Ruskettuminen aiheutuu ihossa olevien pigmenttisolujen siirtymisestä lähemmäksi ihon pintaa sekä uusien pigmenttisolujen syntymisestä. Rusketus on ihon suojausmekanismi UV-säteilyn läpäisyn vähentämiseksi. Ruskettumista voi syntyä myös ilman eryteeman muodostumista. Toistuvan säteilytyksen seurauksena voi olla ihon ennenaikainen vanheneminen tai pahimmassa tapauksessa ihosyöpä.

UV-B- ja UV-C-säteily vahingoittavat solun DNA-molekyylejä ja voivat johtaa ihosyöpään. UV-B- säteily pystyy tunkeutumaan syvemmälle elävään kudokseen, joten sitä pidetään tässä suhteessa vaarallisempana. Melanooma on ihosyöpätyypeistä vaarallisin. Tutkimustulokset UV-säteilyn osuudesta melanoomaan eivät kuitenkaan ole yksiselitteisiä. Tyvisolu- ja okasolusyövän uskotaan aiheutuvan pääasiassa kroonisen UV-altistumisen seurauksena. Niitä voidaan hoitaa menestyksellisesti.

UV-säteilyä käytetään myös lääketieteessä erilaisten sairaustilojen hoidossa. UV-B-säteilyä käytetään useiden ihosairauksien hoitoon. Psoriasiksen hoitoon käytetään UV-A-säteilyä ns. PUVA-hoitona. Vastaärsytyshoidossa aiheutetaan suurilla UV-säteilyannoksilla voimakas paikallinen ihoärsytys, jolla voidaan vaikuttaa mm. nivelten kulumavikojen aiheuttamien kiputilojen poistamiseen. Hammashoidossa UV-A-säteilyä käytetään paikkojen nopeaan kovettamiseen. UV-C-säteilyä ei käytetä lääketieteessä [58, 59].

6.3 Muita vaikutuksia

6.3.1 Esineitä haalistava vaikutus

Useat materiaalit ja niiden värit vaurioituvat ja haalistuvat säteilyn vaikutuksesta. Tämä on huomioitava erityisesti valaistaessa museoita ja näyttelytiloja, jotka sisältävät korvaamattomia ja arvokkaita esineitä. Myös myymälöissä valaistuksen tuotteita haalistava vaikutus tulee ottaa huomioon. UV-säteily on tässä suhteessa haitallisinta, koska se kaikkein todennäköisemmin aiheuttaa valokemiallisia muutoksia orgaanisissa materiaaleissa. On todettu, että alle 300 nm UV-säteily voi joissain tapauksissa aiheuttaa hyvin nopeaa esineiden haalistumista ja myös muunlaista turmeltumista. UV-säteilyn alueella 300 - 400 nm on todettu todennäköisimmin aiheuttavan enemmän haalistumista kuin sama määrä säteilyä näkyvällä alueella. Pidempien aallonpituuksien absorptio esineissä edistää kemiallisia muutoksia ainoastaan lämpövaikutuksen vuoksi. Erityisen arkoja säteilylle ovat mm. tietyt tekstiilit, vesivärit, painotuotteet, piirustukset, postimerkit sekä monet luonnonhistorialliset, erityisesti kasvitieteellisiä näytteitä sisältävät näyttelyesineet. Valaistusvoimakkuus sekä altistumisaika vaikuttavat esineissä tapahtuviin muutoksiin. Suuri kosteus kiihdyttää säteilyn aiheuttamaa esineiden haalistumista ja vaurioitumista [39, 60].

6.3.2 Vaikutus muoveihin

Muovit ovat orgaanisia aineita, jotka ovat muodostuneet yhden tai useamman pienimolekyyllisen aineen liittyessä kemiallisesti yhteen suuremmaksi yhdisteeksi. Näitä suurimolekyyllisiä aineita kutsutaan polymeereiksi. UV-säteilyllä on haitallinen vaikutus polymeereihin, sillä lyhytaaltoisen säteilyn säteilyenergia on yleensä suurempi kuin useiden polymeereissä esiintyvien sidosten katkeamiseen tarvittava energia. UV-säteilyn vaikutuksesta polymeerien kovalenttiset sidokset katkeavat. Nämä UV-säteilyn aiheuttamat muutokset näkyvät muovien kellastumisena. Lisäksi UV-säteily saattaa aiheuttaa muovien säröilyä sekä lujuusominaisuuksien heikkenemistä. Lämpötilan nousu ja kosteus lisäävät UV-säteilyn haitallisia vaikutuksia muoveille. Kullakin muovilajilla on tietty aallonpituus, jolla säteilyn haitalliset vaikutukset ovat suurimmillaan.

Taulukkoon 6.1 on koottu valaisinmateriaaleina käytettyjen muovien suurimpia sallittuja käyttölämpötiloja sekä esitetty ne säteilyn aallonpituudet, joille kukin

muovilaatu on erityisen herkkä. UV-säteilyn muoveja kellastava vaikutus on erityisen suuri, kun muovien käyttölämpötila on lähellä sallittua maksimiarvoa [61, 62, 63].

Taulukko 6.1 Valaisinmateriaaleina käytettyjen muovien suurin sallittu käyttölämpötila t_{max} sekä aallonpituus λ , jolla UV-säteilyn haitalliset vaikutukset kullekin muoville ovat suurimmillaan.

Muovilaji	$t_{max} / ^\circ C$	λ / nm
Polykarbonaatti (PC)	110...120	295
Akryylimuovi eli polymetyylimetakrylaatti (PMMA)	n. 80	290 - 315
Polyvinyylikloridi (PVC)	60	310
Selluloosa-aseto- butyraatti (CAB)	90	296

UV-säteilyn vaikutuksien eliminoimiseksi valaisinmateriaaleina käytetyissä muoveissa on käytettävä ns. UV-stabilisaattoreita. Näiden muovien valonsuoja-aineiden toiminta voi perustua eri mekanismeihin. UV-absorbaattorit absorboivat muoveille haitallista säteilyä muuttaen sen lämmöksi. Sammuttajat ovat valonsuoja-aineita, jotka absorboivat muoviin tulevaa energiaa muuttaen sen lämmöksi tai fosforenssi/fluoresenssisäteilyksi. Radikaalinsieppajat ovat valonsuoja-aineina toimivia yhdisteitä, jotka reagoivat kovalenttisten sidosten katkeamisen seurauksena syntyneiden radikaalien kanssa muuttaen ne reagoimattomaan muotoon [62].

6.3.3 Käyttö teollisuudessa

UV-säteilyä voidaan käyttää hyväksi erilaisissa teollisuuden prosesseissa. Säteilyn käyttöaloja ovat mm. liimojen, lakkojen ja erikoismuovien kovetus, nopeatetut vanhennusprosessit sekä valkaisu.

Lyhytaaltoista UV-säteilyä käytetään laboratorioissa bakteerien ja muiden mikro-organismien tuhoamiseen. UV-säteilyn bakteereja tuhoava vaikutus on suurimmillaan aallonpituuden 260 nm kohdalla [59].

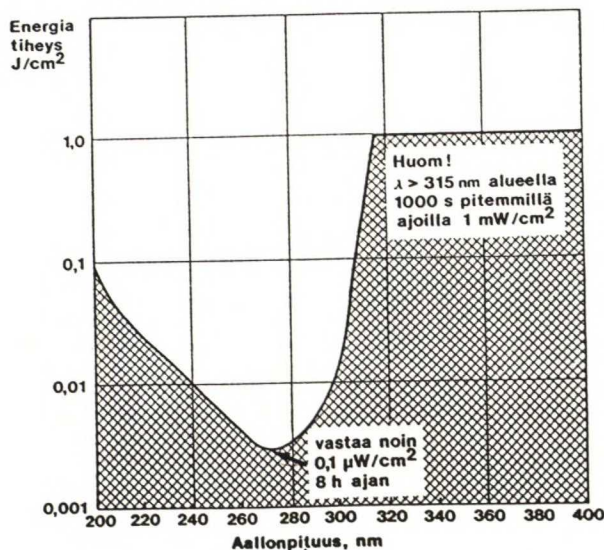
6.4 Työterveydelliset suositukset

Amerikkalainen työhygieenikkejärjestö ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) on ottanut käyttöön UV-säteilyaltistumista koskevat enimmäisarvot, jotka perustuvat säteilyn aiheuttamiin silmä- ja ihovai- kutuksiin. Maailman terveysjärjestö WHO suosittelee näiden raja-arvojen käyt- töä. Suomessa Työterveyslaitos käyttää ACGIH:n raja-arvosuosituksia [59].

ACGIH:n raja-arvoissa on huomioitu UV-säteilyn kunkin aallonpituuden sil- mälle ja iholle aiheuttama vaikutus. Aallonpituusalueella 200 - 315 nm on kul- lekin aallonpituudelle määritelty suhteellinen spektriherkkyyskerroin sekä sä- teilyn energiatihedysen enimmäisarvo. Enimmäisarvot ovat suurimmat sallitut suojaamattomalle iholle tai silmiin kahdeksan tunnin aikana tulevat säteilyan- nokset. Suhteellisella spektriherkkyyskertomella painotettu energiatiheys saa kullakin aallonpituudella olla korkeintaan 30 J/m^2 . Suurin suhteellisen spekt- riherkkyyskertomien arvo on aallonpituudella $\lambda = 270 \text{ nm}$, joten tätä aallonpi- tuutta vastaa pienin sallittu energiatiheys.

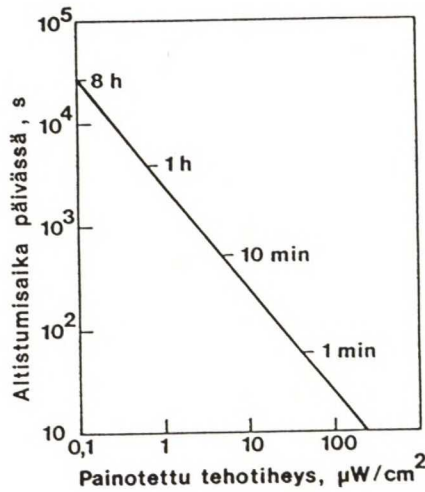
ACGIH:n raja-arvo 315 nm pitempiaaltoiselle säteilylle (UV-A) riippuu sätei- lylle altistumisen kestosta. Aallonpituusalueella 315 - 400 nm kokonaissäteilyn tehotiheys ei saa ylittää arvoa 1 mW/cm^2 1000 s pitempinä aikoina eikä säteilyn energiatiheys arvoa 1 J/cm^2 1000 s lyhyempinä aikoina.

Kuvassa 6.1 on graafisesti esitetty em. raja-arvoihin perustuva säteilyn suurin sallittu energiatiheys aallonpituuden funktiona.



Kuva 6.1 ACGIH:n raja-arvosuositus UV-säteilylle.

Useita aallonpituuksia sisältävästä laajakaistaisesta säteilystä määritetään suhteellisten spektriherkkyyskertoimien avulla painotettu säteilyn tehotiheys. Sallittu päivittäinen altistumisaika 200 - 315 nm UV-säteilylle saadaan jakamalla suurin sallittu energiatiheys 30 J/m^2 painotetulla tehotiheydellä. Päivittäiset altistumisaikat voidaan määrittää myös kuvan 6.2 avulla [59].



Kuva 6.2 Enimmäisaltistumisaikat 200 - 315 nm aallonpitukselle säteilylle suhteellisen spektriherkkyyskertoimen avulla painotetun tehotiheyden funktiona.

6.5 Monimetallilamppujen ja suurpainenatriumlamppujen UV-säteily

Monimetallilampun purkausputkessa syntyvän spektrin UV-säteilyn osuus riippuu käytetyistä metalliyhdisteistä. Purkausputkimateriaalina käytetty kvartsilasi läpäisee syntyneen säteilyn aallonpituusalueella 185 - 4000 nm, mikä sisältää koko UV-alueen lukuunottamatta UV-C:n (100 - 280 nm) lyhyimpiä aallonpituuksia.

Luvussa 4.4.4 on tarkasteltu eri metalliyhdisteitä sisältävien 400 W monimetallilamppujen tehojakautumia. Tarkastelussa on mukana natrium-tallium-indium-monimetallilamppu, natrium-skandium-monimetallilamppu sekä dysprosium-pohjainen ja tina-pohjainen monimetallilamppu. Suurin UV-säteilytehon osuus tarkastelluista lampuista on natrium-skandium-lampulla, jossa 11.5 % lampun

kokonaistehosta muuttuu UV-säteilytehoksi. Tarkastelluista lamppuista tinapohjaisen lampun UV-säteilytehon osuus (3 % lampun kokonaistehosta) on pienin. Lampun ulkokuvun materiaalista riippuu, mikä osuus purkauksessa syntyneestä UV-säteilystä läpäisee ulkokuvun.

Kierrekantaisten monimetallilamppujen (luvut 3.1.7.1 ja 3.1.7.3) ulkokuvun materiaalina käytetään borosilikaattilasiasia. Borosilikaattilasi absorboi suurimman osan purkauksessa syntyneestä UV-säteilystä muuttaen sen lämmöksi. Tieto borosilikaattilasin säteilyn läpäisykyvystä eri aallonpituuksilla on kuitenkin osittain puutteellista.

Kaksikantaisten monimetallilamppujen sekä pienitehoisten erikoiskannalla varustettujen yksikantaisten monimetallilamppujen (luku 3.1.7.2) ulkokuvun materiaalina käytetään kvartsilasia. Koska kvartsilasi läpäisee säteilyn aallonpituusalueella 185 - 4000 nm, läpäisee lampun ulkokupu näillä lamppuilla purkauksessa syntyneen UV-säteilyn lukuunottamatta UV-C:n lyhyimpiä aallonpituuksia. Näiden lamppujen valaisimissa on käytettävä UV-säteilyn absorboivaa suojalasia.

Valonheitinkäyttöön tarkoitettujen erikoisrakenteisten monimetallilamppujen (luku 3.1.7.4) purkausputkessa käytetään tavallisimmin dysprosiumin, tuliumin ja holmiumin jodideja. Näiden yhdisteiden avulla purkausputken kaasupurkauksesta saadaan päivänvaloa muistuttava spektri. Purkaus säteilee voimakkaasti myös UV-alueella säteilyn alkaessa noin 220 nm:stä ja ulottuessa yli koko näkyvän alueen. Lamppuissa ei ole ulkokupua, jolloin valon suuntaus valonheittimessä helpottuu. Valonheittimestä lähtevä säteily sisältää näin merkittävässä määrin myös UV-säteilyä [39].

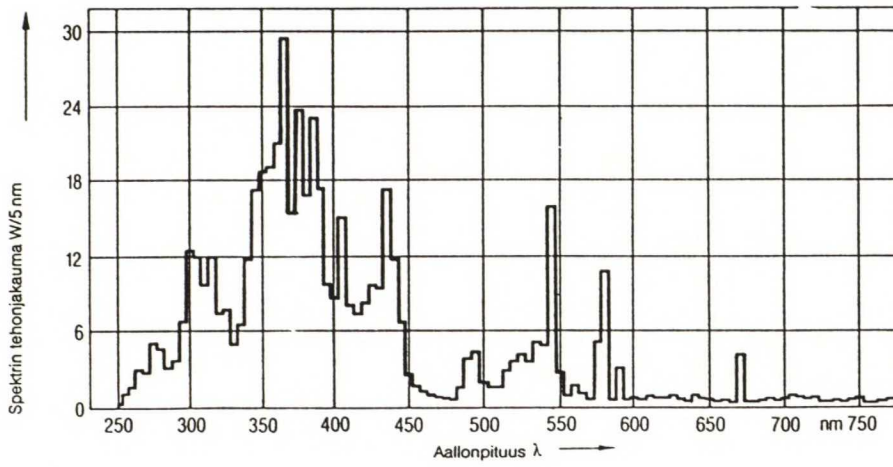
Työterveyslaitoksen ja Helsingin Yliopiston tutkijoiden sekä Oy Yleisradio Ab:n yhteistyönä tekemässä tutkimuksessa tutkittiin mm. altistumista valonheittimien UV-säteilylle studio- ja näyttämötyössä [64]. Valonlähteinä käytettiin 575 - 4 000 W valonheitinkäyttöön tarkoitettuja monimetallilamppuja sekä halogeenilamppuja. Tutkimuksessa mitattiin valonheittimien UV-säteilyn spektrijakaumat ja tehotiheydet. Mittaustuloksien avulla määritettiin ACGIH:n raja-arvojen mukaiset painotetut tehotiheydet sekä niitä vastaavat suositeltavat päivittäiset enimmäisaltistumisajat. Taulukossa 6.2 on esitetty muutamien tutkimuksessa mitattujen monimetallilamppujen UV-A-säteilyn tehotiheydet E_{UV-A} ja painotetut tehotiheydet E_{eff} sekä näiden perusteella lasketut suositeltavat päivittäiset altistumisajat t_a . Mittauksia suoritettiin, kun valonheittimien valo oli kohdistettu laajalle alueelle (taulukossa S = suuri piste) ja kun valo fokusoitiin kapeaksi keilaksi (taulukossa P = pieni piste).

Taulukko 6.2 Työterveyslaitoksen, Helsingin Yliopiston ja Oy Yleisradio Ab:n tekemässä tutkimuksessa mitatut monimetallilamppujen UV-A-säteilyn tehottiheydet E_{UV-A} , painotetut tehottiheydet E_{eff} sekä näistä lasketut suositeltavat päivittäiset enimmäisaltistumisajat t_a .

Valonheitin ja lampputeho	Mittaus etäisyys / m	E_{UV-A} / $\frac{mW}{cm^2}$	E_{eff} / $\frac{\mu W}{cm^2}$	t_a	Valon kohdistus
A, 1 200 W	2.25	0.8	0.18	4.7 h	S
	4.50	0.2	0.07	-	S
B, 575 W	2.25	0.4	0.48	1.8 h	S
B, 1 200 W	2.25	1.5	6.90	7 min	S
C, 575 W	2.25	2.5	0.21	7 min	P
D, 2 500 W	2.25	3.5	0.25	5 min	P

ACGIH:n suositusten mukaan UV-A-säteilyn tehottiheys ei saa olla yli 1 mW/cm^2 kun altistumisaika on pitempi kuin 1000 s. Useiden mitattujen valonheittimien UV-A-säteilyn määrä ylitti tämän suositusarvon, kun mittausetäisyytenä oli 2.25 m. Valonheittimien säädöt (valon kohdistus laajalle alueelle / valon fokusointi kapeaksi keilaksi) vaikuttavat myös tiettyyn kohteeseen tuleviin säteilyn tehottiheksiin ja siten sallittuun altistumisaikaan. Tutkimuksessa mittaukset osoittivat useiden valonheittimien kohdalla suositeltavan päivittäisen altistumisaikan olevan vain muutamia minuutteja, jos UV-säteily kohdistuu suoraan silmiin tai kasvoihin. Suoraa altistumista säteilylle ja tarpeetonta katselua valonheittimiin tulisi välttää [64].

Teollisuuden erikoiskäyttöön tarkoitettujen monimetallilamppujen (luku 3.1.7.5) spektri sisältää eri prosessien kannalta tarpeellista UV-säteilyä. Lamp-
pujen säteily on pääasiassa UV-A-säteilyä sekä osaksi myös UV-B-säteilyä ja säteilyä näkyvän valon lyhyimmillä aallonpituuksilla. Säteilyä tuottavina metalleina lamppuissa käytetään elohopean ohella mm. rautaa, kobolttia, magnesiumia, galliumia ja lyijyä. Rauta tuottaa UV-A-säteilyä aallonpituusalueella 350 - 400 nm ja koboltti alueella 340 - 360 nm [65]. Kuvassa 6.3 on tyypillinen UV-säteilijänä toimivan monimetallilampun spektri [34].



Kuva 6.3 UV-säteilijänä toimivan monimetallilampun spektri.

Värikorjattujen samoin kuin tavallisten suurpainenatriumlamppujen spektrin UV-säteilytehon osuus on hyvin pieni, tyypillisesti noin 0.5 % lampun kokonaistehosta.

7. Mittauksia koskevat suositukset ja ohjeet

7.1 Standardit

7.1.1 Suurpainenatriumlamput

Suurpainenatriumlamppuja koskevassa lamppustandardissa (High-pressure sodium vapour lamps, IEC-julkaisu 662 1980) on esitetty suosituksia lamppujen tyyppikokeisiin liittyvistä mittauksista.

Lamppujen tyyppikokeiden tarkoituksena on todeta, että lamput täyttävät niille asetetut vaatimukset. Mittaukset suoritetaan yhdelle tai useammalle samanlaiselle näytelampulle. Mainitussa standardissa on esitetty suosituksia koskien lamppujen syttymiskoetta, lämpenemiskoetta, sähköisten arvojen mittausta sekä sammumisjännitekoetta.

Näissä mittauksissa lamppuja tulee polttaa vapaassa tilassa vaakasuorassa polttoasennossa. Ympäristön lämpötilan tulee olla $+ 25 \pm 5^{\circ}C$. Syöttöjännitteen tulee olla sinimuotoista syöttötaajuuden ollessa 50 Hz. Liitäntälaitteena tulee käyttää referenssikuristinta, jonka arvot määritellään kullekin lampputeholle standardin datalehtien yhteydessä [47].

7.1.2 Monimetallilamput

Monimetallilampuista ei toistaiseksi ole julkaistu lamppustandardia. Monimetallilamppuja koskeva IEC-standardi on parhaillaan kehitteillä.

7.2 CIE-julkaisut

7.2.1 Valonheittimien valotekniset mittaukset

Kansainvälisen valaistuskomission CIE:n (engl. International Commission on Illumination) julkaisussa numero 43 (Photometry of floodlights, 1979) on käsitelty valonheittimien valomittauksia [66]. Julkaisu on suositusluonteinen ja kattaa sekä sisä- että ulkokäyttöön tarkoitetut valonheittimet, joissa valonlähteinä voidaan käyttää purkauslamppuja (suurpainenatrium-, pienpainenatrium-, elohopea- ja monimetallilamput), loistelamppuja sekä hehku- tai halogeenilamppuja.

Julkaisun tarkoituksena on suositusluonteisesti antaa ohjeita koejärjestelyistä mitattaessa valonheitinten fotometrisiä ominaisuuksia. Suositusten pyrkimyksenä on antaa perusta yhtenäisille kansallisille standardeille sekä opastaa teollisia laboratorioita koelaitteiden valinnassa, mittausten suorittamisessa sekä valonheitinten ominaisuuksien raportoinnissa.

Laboratoriolaitteiston osalta määritellään vaatimuksia mm. teholähteelle, jonka tulisi olla stabiloitu. Syöttöjännitteenä tulee käyttää valaisimen tai lampun nimellisjännitettä. Syöttöjännitteen vaihtelu saa purkauslampuilla olla korkeintaan 0.5 %. Jännitteen aaltomuodon tulee olla sellainen, että harmoonisten komponenttien osuus on korkeintaan 3 % perusaallosta.

Purkauslamppuja suositellaan valovirran stabiloitumisen takia vanhennettavan vähintään 200 tuntia ennen mittauksia. Lamppujen vanhennus tulisi tehdä jaksossa, jossa jokaista neljää tuntia kohden lamput ovat sammuksissa 15 minuuttia. Mittausolosuhteiden osalta painotetaan, että eri laboratorioissa mittausolosuhteiden tulee olla samanlaisia mittausten oikean vertailukelpoisuuden vuoksi. Ilmavirtauksia mittaustilassa tulee välttää. Ympäristön lämpötilan mittauksissa tulee olla 25°C.

7.2.2 Katuvalaistuksen valaisimien valotekniset mittaukset

CIE:n julkaisussa numero 27 (Photometry of luminaires for street lighting, 1973) on käsitelty katuvalaistuksessa käytettävien valaisimien valomittauksia

[67]. Julkaisun tavoitteena on suositusluonteisesti antaa ohjeita koejärjestelyissä pyrittäessä määrittämään ja raportoimaan katuvalaistuksessa käytettävien valaisimien fotometrisiä ominaisuuksia. Suositukset on tarkoitettu antamaan perusta yhtenäisille kansallisille standardeille sekä opastamaan teollisia laboratorioita koelaitteiden valinnassa sekä mittausten suorittamisessa. Julkaisussa käsitellyt mittaukset koskevat pääasiassa katuvalaistukseen tarkoitettuja valaisimia, joissa valonlähteinä voidaan käyttää purkauslamppuja, loistelamppuja sekä hehkulamppuja.

Julkaisussa selvitetään koejärjestelyjen ja koelaitteiden valintaa sekä määritetään suositus mittaustarkkuudelle. Suositusten mukaan valovoiman mittauksissa syntyvien systemaattisten ja satunnaisten virheiden kokonaisvirheen tulee olla alle $\pm 5\%$ tai alhaisilla valovoiman arvoilla vaihtoehtoisesti $\pm 1 \text{ cd}/1000 \text{ lm}$. Kulman mittauksissa kokonaisvirheen tulisi olla alle $\pm 0.5^\circ$. Mittaukset tulee suorittaa valaisimeen merkityllä nimellisjännitteellä ja -taajuudella. Mittausten aikana saa syöttöjännitteen ja taajuuden vaihtelu olla korkeintaan $\pm 0.5\%$. Syöttöjännitteen harmonisten komponenttien osuus ei saa olla yli 3 %.

Lisäksi on selvitetty vaatimuksia laboratorio-olosuhteille ja selvitetty kokeissa käytettävien lamppujen ja valaisimien valintaa. Ympäristön lämpötilan tulee olla $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Julkaisussa on käsitelty korjauskertoimien määrittelyä, kun valaisimen toimintaolosuhteet poikkeavat määritellyistä koeolosuhteista. Myös mittaustulosten raportointia on käsitelty.

7.2.3 Valovoiman jakauman mittaus

CIE:n julkaisuun numero 70 (The measurement of absolute luminous intensity distributions, 1987) on koottu olemassaolevaan tietämykseen ja kokemukseen perustuvaa tietoa valonlähteiden ja valaisimien valovoiman jakauman mittauksesta [68]. Julkaisun tiedot ovat suositusluonteisia. Nämä suositukset koskevat erityyppisten valonlähteiden valovoiman jakauman mittauksia (hehkulamput, loistelamput, purkauslamput).

Julkaisussa on selvitetty valovoiman jakauman mittauksiin liittyvää terminologiaa, käsitelty tarvittavien valoteknisten mittalaitteiden ominaisuuksia sekä esitetty yhteenveto mittauksien periaatteista. Myös mittausten suorittamista, mittaolosuhteita sekä tulosten esittämistä on käsitelty. Seuraavassa esitetään muutamia kohtia julkaisussa olevista suosituksista mittaolosuhteiden osalta.

Koska lamppujen ominaisuudet muuttuvat niiden eliniän aikana, tulisi lamp-
puja vanhentaa ennen mittauksia. Mittaukset tulee suorittaa vedottomassa
tilassa, jonka lämpötilaksi suositellaan $+ 25^{\circ}\text{C}$. Ennen mittausten aloittamista
on lampun saatava palaa tietty aika oikean lämpötasapainon saavuttamiseksi.
Myös sähkö- ja valoteknisten mittareiden tulee saada lämmitä ennen mittaus-
ten aloittamista. Lamput vaativat myös tietyn stabiloitumisajan, jonka aikana
sähköiset arvot ja valovirta tasaantuvat. Tämän stabiloitumisajan aikana ul-
koisten olosuhteiden tulee olla samanlaiset kuin mittausten aikana. Polttoasen-
non muutoksia stabiloitumisen aikana on vältettävä. Purkauslamppujen säh-
köisten arvojen mittareina mittareina tulee käyttää ns. true r.m.s.-mittareita
(todellisen tehollisarvon mittareita).

Syöttöjännitteen vaihtelu saa lamppujen vanhenemisen aikana olla korkeintaan
 $\pm 0.5\%$ ja mittausten aikana korkeintaan $\pm 0.1\%$. Syöttöjännitteen harmoonis-
ten komponenttien osuus ei saa olla yli 3 %. Taajuuden tulee säilyä rajoissa
 $\pm 0.1\%$ liitäntälaitteen nimellistaajuudesta. Mikäli lamppujen liitäntälaitteena
käytetään muuta kuin referenssikuristinta, on tämä mainittava tulosten yhtey-
dessä.

7.3 IES-julkaisut

Amerikkalainen valaistusjärjestö Illuminating Engineering Society (IES) on
julkaissut lehdessään vuonna 1981 ohjeita koskien monimetallilamppujen, suur-
painenatriumlamppujen sekä elohopealamppujen polttoikäkokeiden koejärjes-
telyjä [69]. Ohjeiden tarkoituksena on luoda yhtenäisyyttä lamppujen poltto-
ikämittauksiin sekä niiden raportointiin.

Ohjeiden mukaan polttotilan lämpötilan tulee olla $25 \pm 10^{\circ}\text{C}$. Tätä korkeampi
lämpötila on haitallinen lähinnä lamppujen liitäntälaitteiden kannalta. Liian
alhainen lämpötila puolestaan vaikeuttaa lamppujen syttymistä, mikä voi vai-
kuttaa lamppujen elinikään. Voimakkaita ilmavirtauksia mittaustilassa tulee
välttää. Lamppuihin kohdistuvia iskuja ja niiden tärähtelyä kuljetuksen, kä-
sittelyn sekä mittausten aikana tulee välttää. Ennen monimetallilamppujen ja
suurpainenatriumlamppujen polttoasennon muuttamista tai suuntaamista on
lamppujen saatava jäähtyä ulkoiseen lämpötilaan, sillä polttoasennon muutok-
set saattavat aiheuttaa muutoksia mm. lamppujen sähköisissä suureissa ja vä-
riominaisuuksissa. Polttotilan tulee olla suhteellisen puhdas ja kuiva.

Polttotelineen tulee olla sellainen, etteivät lamput ja liitäntälaitteet ylikuumene telineissä. Mikäli lamppuja ei mittauksissa polteta valaisimissa, saattaa olla tarpeellista varustaa jokainen lamppu suojakehyksellä turvallisuussyistä. Valaisimissa tulee välttää heijastimia, jotka heijastavat säteilyä tai lämpöä joko purkausputkeen tai lampun ulkokuppuun.

Liitäntälaitteiden tulee olla ao. lamppujen liitäntälaitestandardien mukaisia. Liitäntälaitteiden ominaisuudet tulee mittauksin tarkistaa vähintään kerran vuodessa. Syöttöjännitteen arvojen tulee vastata liitäntälaitteiden nimellisjännitettä sekä -taajuutta. Jännite ei saa vaihdella enempää kuin $\pm 2\%$ nimellisarvostaan.

Ennen mittauksien aloittamista saattaa olla tarpeellista pyyhkiä lampun ulkokupu puhtaaksi sormenjäljistä. Lamppujen merkintä on tehtävä siten, ettei se vuosien kuluessa häviä lämmön tai säteilyn vaikutuksesta. Polttoasentona tulee käyttää valmistajan sallimaa polttoasentoa. Mikäli polttoasento on vapaa, tulee samanlaiset lamppuerät mitata samassa polttoasennossa.

Polttoikäkokeiden polttojaksoksi suositellaan jaksoa, jossa 11 tunnin polton jälkeen seuraa 1 tunnin tauko. Myös muita polttojaksoja voidaan käyttää. Ohjeissa muistutetaan kuitenkin, ettei erilaisin polttojaksoin suoritettujen polttoikäkokeiden tuloksia voida vertailla keskenään, ellei tarkoituksena ole nimenomaan vertailla polttojakson vaikutusta lamppujen toimintaan. Lamppujen seuranta voidaan suorittaa joko visuaalisesti tai se voidaan automatisoida. Visuaalisessa seurannassa on lamppujen tarkkailu tehtävä päivittäin.

Lamppujen loppuunpalamisen yhteydessä tulee varmistaa, ettei tämä johdu mittauslaitteiden mahdollisesta virhetoiminnasta. Loppuunpalamisen syy on mahdollisuuksien mukaan pyrittävä analysoimaan.

Koejärjestelyt tulee selkeästi raportoida. Raporteista tulee ilmetä lamppujen polttoasento, polttojakso, syöttöjännite, mittausvälit sekä mahdolliset muut mittauksia kuvaavat tiedot.

Edellä käsitellyn IES-lehtiartikkelin aihepiiristä on ilmestynyt IES-julkaisu vuonna 1987 (IES Approved Method for Life Testing of High Intensity Discharge Lamps). Edellä käsitellyn lehtiartikkelin sisältöä on osittain tarkistettu tässä julkaisussa.

IES-julkaisussa 'Photometric Testing of High Intensity Discharge Lamps, 1984' on käsitelty elohopea-, monimetalli- ja suurpainenatriumlamppujen valomittauksia.

IES-julkaisussa 'Photometric Testing of Indoor Luminaires Using High Intensity Discharge Lamps, 1985' on käsitelty em. lamppujen valaisimien valomittauksia.

7.4 Yhteenveto

Monimetallilamppujen ja suurpainenatriumlamppujen mittauksiin liittyviä suosituksia ja ohjeita on suhteellisen vähän. Suurpainenatriumlamppuja koskevassa lamppustandardissa on esitetty suosituksia lamppujen tyyppikokeisiin liittyvistä mittauksista. CIE (engl. International Commission on Illumination) on julkaissut suosituksia koskien valonheittimien ja katuvalaistuksen valaisimien valoteknisiä mittauksia sekä valovoiman jakauman mittauksia. Mainitut CIE-julkaisut koskevat periaatteessa kaikkia purkauslamppuja sekä loiste- ja hehkulamppuja. Amerikkalainen valaistusjärjestö IES (Illuminating Engineering Society) on julkaissut ohjeita elohopea-, monimetalli- ja suurpainenatriumlamppujen polttoikäkokeista sekä lamppujen ja näiden valaisimien valomittauksista.

Eri julkaisuissa esitetään, että mittaukset tulee suorittaa lampun/liitäntälaitteen nimellisjännitteellä ja -taajuudella. Syöttöjännitteen vaihtelun tulisi mittausten aikana olla korkeintaan $\pm 0.1 \dots \pm 2\%$. Syöttöjännitteen harmonisten komponenttien osuus ei yleensä saisi olla yli 3 %. Mittauksissa ympäristön lämpötilan tulisi olla 25 °C. Ympäristön lämpötilan sallitut vaihtelualueet ovat eri julkaisuissa erilaisia.

8. Suoritetut mittaukset

8.1 Yleistä

Vaikka monimetallilamppuja ja värikorjattuja suurpainenatriumlamppuja on markkinoilla ollut jo useita vuosia, on tietoa niiden toiminnasta nimellisistä poikkeavissa toimintaolosuhteissa suhteellisen vähän. Haluttaessa perusteellisesti tutkia lamppujen ominaisuuksia on tutkittava mm. syöttöjännitteen, valaisimen rakenteen, ympäristön lämpötilan ja polttoasennon vaikutusta lamppujen toimintaan. Perusteellisen tutkimuksen edellytyksenä on myös useamman saman lampputyypin mukaanottaminen kokeisiin, kuten myös tutkimuksen ulottaminen eri valmistajien lamppuihin. Koska varsinkin monimetallilampuilla on useita eri lampputyyppejä sekä tehoversioita, ei minkään mittaussarjan tuloksia voida yleistää koskemaan koko monimetallilamppumallistoa.

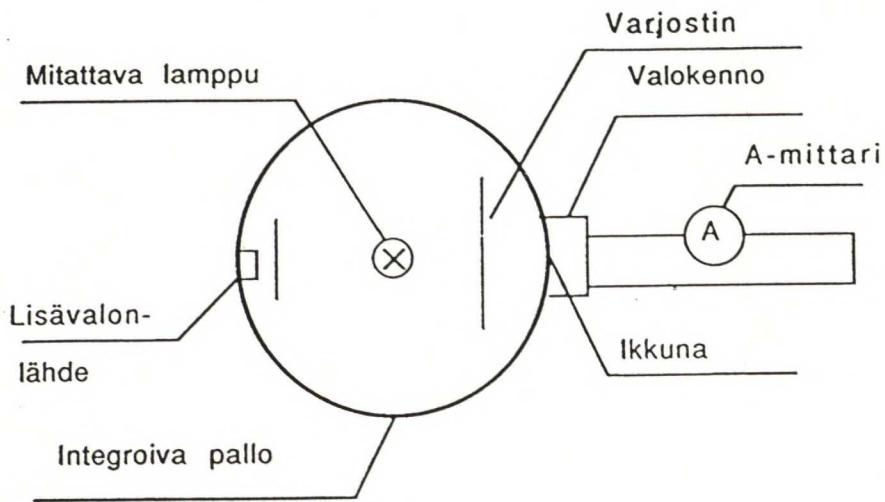
Tässä työssä keskitytään mittauksien osalta ajan puutteen vuoksi muutamiin olennaisimmiksi katsottuihin seikkoihin. Olemassa oleva tieto sekä monimetallilamppujen että värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen käyttäytymisestä verkkojännitevaihteluissa sekä erityisesti säädinkäytössä on varsin niukkaa ja mittauksia eri tahoilla on aiheesta tehty vähän. Tämän johdosta ovat tässä työssä tehdyt mittaukset painottuneet tutkimaan lamppujen käyttäytymistä syöttöjännitettä säädettäessä. Mittauksissa pyrittiin tutkimaan syöttöjännitteen vaikutusta lamppujen valontuottoon, sähköisiin arvoihin sekä väriominaisuuksiin. Mittaukset suoritettiin Teknillisen Korkeakoulun Sähkölaitos- ja valaistusteknikan laboratoriossa.

Erityisesti kvartsilasisella ulkokuvulla varustettujen monimetallilamppujen ultraviolettisäteilyn tuottoon on kiinnitettävä riittävästi huomiota. Tieto lamppujen UV-säteilyn määrästä on ilmeisesti osittain puutteellista. Työn yhteydessä mitattiin kvartsilasisella ulkovulla varustetun kaksikantaisen monimetallilampun UV-säteilyn tuottoa. Mittaukset suoritettiin Työterveyslaitoksen laboratoriossa Vantaalla.

8.2 Valontuoton ja väriominaisuuksien riippuvuus syöttöjännitteestä

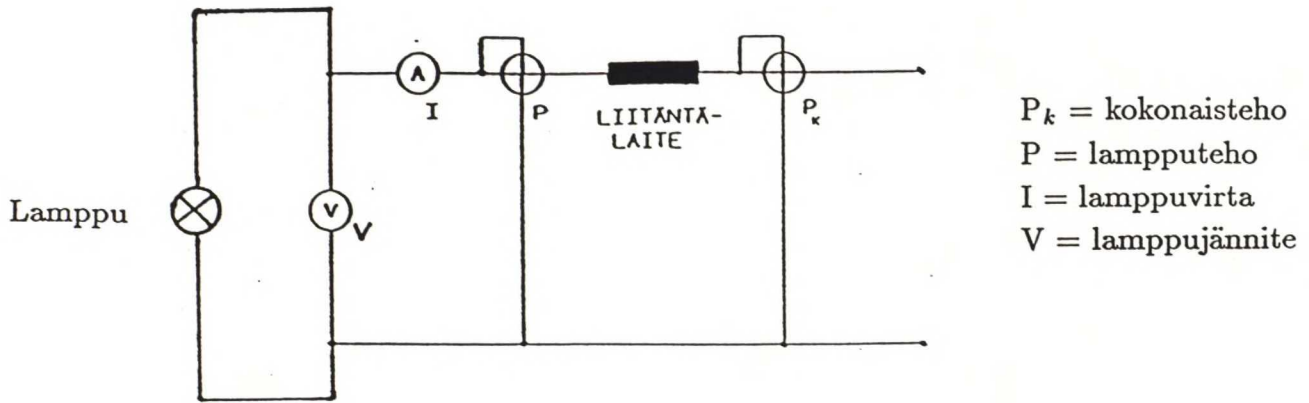
8.2.1 Mittausjärjestelyt

Lamppujen valovirran mittaukset suoritettiin lampun ollessa Ulbrichtin pallossa, jonka halkaisija on 2.5 m. Valovirran mittausjärjestelyt Ulbrichtin pallossa on esitetty kuvassa 8.1. Referenssilamppuna käytettiin hehkulamppunormaalia.



Kuva 8.1 Valovirran mittausjärjestely Ulbrichtin pallossa.

Valovirtamittausten yhteydessä suoritettiin myös lamppuvirran, lamppujännitteen, lampputehon sekä lampun ja liitäntälaitteen kokonaistehon mittaus. Lampun sähköisten arvojen mittauspiiri on esitetty kuvassa 8.2.



Kuva 8.2 Sähköisten suureiden mittausjärjestelyt.

Lampun valovirran ja sähköisten arvojen mittausten yhteydessä suoritettiin lisäksi mittauksia spektrifotometrillä, jonka avulla saatiin mitattua säteilyn spektrijakauma sekä valon värilämpötila ja värikoordinaatit. Spektrifotometri-mittaukset suoritettiin kohdistamalla mittauskamera valonlähteen lähellä olevaan bariumsulfaattilevyyn, jota oli käytettävä mitattavien lamppujen mittauskameralle liian suuresta kirkkaudesta johtuen. Bariumsulfaattilevystä heijastunut säteily oli suoraan mitattavasta lampusta lähtöisin. Spektrifotometri-mittausten aikana mittaustilassa oli ainoana valonlähteenä mitattava lamppu. Spektrifotometrin tyyppi oli Photo Research PR-703 A Spot Spectra Scan. Mittauskamera oli kytketty mikrotietokoneeseen, johon liitetyn kirjoittimen avulla saatiin tulostettua kunkin spektrimittauksen tulokset.

Mitattavat lamput olivat 100 tuntia vanhennettuja. Mittauksissa lamput olivat Ulbrichtin pallossa mittaustelineessä ilman valaisinta.

Monimetallilampuista mitattiin Osramin 250 W ellipsoidikupuinen lamppu, Osramin kaksi erityyppistä 150 W kaksikantaista lamppua sekä Philipsin 250 W putkimainen, kirkaskupuinen lamppu. Kaksikantaisille monimetallilampuille käytettiin mittauksissa ns. korvaavaa valaisinta, joka on lampun ympärille laitettava, molemmista päistä suljettava kvartsilasiputki. Tätä korvaavaa valaisinta on käytettävä lampun oikean toimintalämpötilan saavuttamiseksi poltettaessa lamppua ilman varsinaista valaisinta. Lamppujen liitälaitteena käytettiin Helvarin referenssikuristimia. Taulukossa 8.1 on esitetty em. lamppujen referenssikuristimien sähköiset arvot.

Taulukko 8.1 Mitattujen monimetallilamppujen referenssikuristimien nimellisjännite, kalibrointivirta, impedanssi sekä tehokerroin.

Lamppu	Nimellisjännite U_n/V	Kalibrointivirta I_{kal}/A	Impedanssi Z/Ω	Tehokerroin
Osram HQI-E 250/D	220	3.00	60.0	0.060
Osram HQI-TS 150/NDL	220	1.80	99.0	0.060
Osram HQI-TS 150/WDL	220	1.80	99.0	0.060
Philips HPI-T 250 W	220	2.15	71.0	0.075

Monimetallilampuista mitattiin lisäksi GE:n 32 W DC-käyttöinen lamppu, jonka liitäntälaitteena käytettiin lamppua varten suunniteltua elektronista liitäntälaitetta Tridonic PCI 32 A 111.

Värikorjatuista suurpainenatriumlampuista mitattiin Philipsin 250 W putkimainen, kirkaskupuinen lamppu. Lampun liitäntälaitteena käytettiin Helvarin referenssikuristinta, jonka sähköiset arvot on esitetty taulukossa 8.1 Osramin 250 W monimetallilampun yhteydessä. Lisäksi mitattiin Philipsin 50 W värikorjattu suurpainenatriumlamppu, jonka liitäntälaitteena käytettiin lamppua varten suunniteltua, valmistajalta saatua kuristinta.

Kustakin lampputyypistä mitattiin yksi lamppu. Kunkin lampun kuristin oli mittauksissa sijoitettu Ulbrichtin pallon ulkopuolelle. Lamppujen sytyttimet oli mittauksissa sijoitettu mittaustelineeseen Ulbrichtin palloon. Jotta lampputehomittauksien tuloksena saataisiin todellinen lampun kuluttama teho, on sytyttimen tehonkulutus otettu huomioon vähentämällä mitatusta lampputehosta kunkin sytyttimen kuluttama teho. Poikkeuksen muodosti GE:n 32 W lamppu, jonka elektroninen liitäntälaite sisältää myös sytytinosan. Tämän lampun elektroninen liitäntälaite sijaitsi mittausten ajan Ulbrichtin pallon ulkopuolella. GE:n 32 W lampun DC-käytön aiheuttamasta poikkeuksellisesta mittaussytkennästä johtuen ei tämän lampun lampputehoa kuitenkaan mitattu. Philipsin 50 W värikorjatun suurpainenatriumlampun kuristin ja sytytin sijaitsivat molemmat pallossa mittausten aikana näiden liitäntälaitteiden erilaisesta johdostusytkennästä ja sytytinlaitteen rajoitetusta johdinpituudesta johtuen.

Koska tällöin mitatun lamppujännitteen ja lampputehon arvot sisälsivät myös kuristimen vastaavat arvot, ei lamppujännitettä ja - tehoa tällä lampulla kirjattu.

Mittausten aikana lamppuja syötettiin stabiloidusta jännitelähteestä. Ennen mittausten aloittamista kunkin lampun annettiin lämmetä liitäntälaitteensa nimellijännitteellä tunnin ajan. Tämän jälkeen suoritettiin lamppujen valovirran ja sähköisten arvojen mittaukset sekä spektrifotometrimittaukset. Em. mittaukset suoritettiin tämän jälkeen nimellijännitteestä poikkeavilla syöttöjännitteen arvoilla. Syöttöjännitettä säädettiin Variac-säätömuuntajalla 10 V välein. Kunkin jänniteensäädön jälkeen lampun annettiin stabiloitua viiden minuutin ajan ennen mittausten suorittamista. Lämpötila Ulbrichtin pallossa oli mittausten aikana $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

8.2.2 Mittaustulokset

8.2.2.1 Monimetallilamppu Osram HQI-E 250/D

Taulukossa 8.2 on esitetty monimetallilampun Osram HQI-E 250/D mittaustulokset. Lampun polttoasennon ollessa vaakasuora mittaukset suoritettiin syöttöjännitteen arvoilla 190 - 230 V. Pystysuorassa polttoasennossa suoritettiin lisäksi mittauksia syöttöjännitteen arvoilla 210 - 230 V. (Valmistaja ilmoittaa lampun polttoasennon olevan vapaa.) Referenssikuristimen nimellijännitteellä eri polttoasunnoissa mitatut lampputehot (257.2 W ja 255.7 W) ovat hieman suurempia kuin valmistajan ilmoittama lampun nimellisteho (250 W). Nimellijännitteellä mitatut valovirran arvot (16 873 lm ja 17 520 lm) eivät merkittävästi poikkea valmistajan ilmoittamasta valovirrasta (17 000 lm). Mittauksissa saatiin nimellijännitteellä eri polttoasunnoissa lampun värilämpötilaksi 4633 K ja 4691 K. Mitatut värilämpötilan arvot ovat alhaisemmat kuin valmistajan ilmoittama lampun värilämpötila 5400 K.

Taulukko 8.2. Monimetallilampun Osram HQI-E 250/D mittaustulokset mitausten suoritusjärjestyksessä (N:o). Syöttöjännite U , lamppuvirta I , lampun ja liitäntälaitteen kokonaisteho P_k , lamppujännite V , lampputeho P , valovirta ϕ , värikoordinaatit x ja y sekä värilämpötila T .

Polttoasento: vaakasuora.

N:o	U / V	I / A	P_k / W	V / V	P / W	Φ / lm	x	y	T / K
1.	220	2.73	292.7	113.8	257.2	16 873	0.359	0.380	4633
2.	230	2.89	316.8	116.6	278.7	18 776	0.366	0.381	4449
3.	210	2.54	259.9	114.4	233.6	14 715	0.347	0.378	5020
4.	200	2.38	231.8	108.8	207.8	12 283	0.335	0.376	5414
5.	190	2.21	206.7	105.0	182.7	9 882	0.325	0.377	5765

Polttoasento: pystysuora, kanta ylös

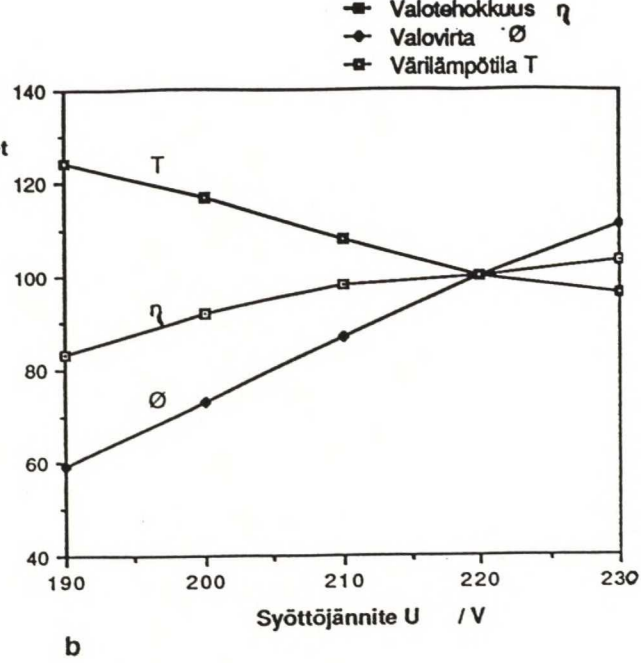
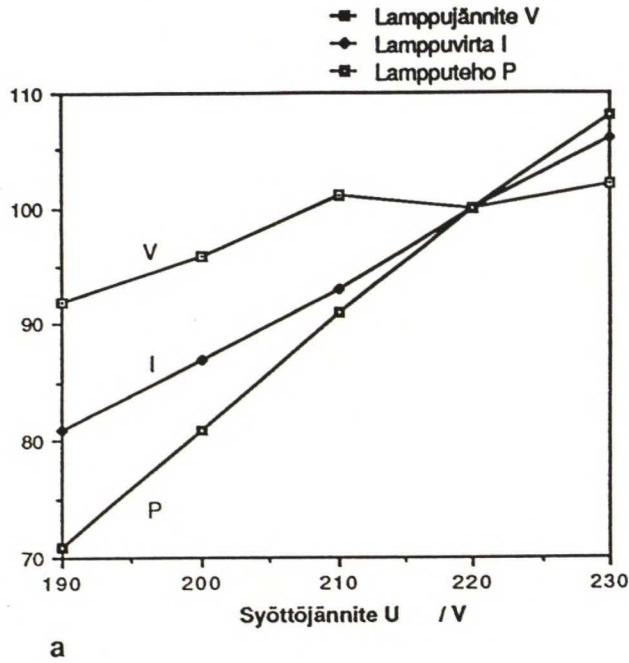
N:o	U / V	I / A	P_k / W	V / V	P / W	Φ / lm	x	y	T / K
6.	220	2.71	291.5	117.0	255.7	17 520	0.356	0.376	4691
7.	230	2.88	318.4	120.1	278.9	19 517	0.361	0.376	4556
8.	210	2.55	267.7	112.1	233.7	15 392	0.349	0.376	4922

Lampun syöttöjännitteen muuttuessa muuttuu liitäntälaitteena käytetyn kuristimen yli oleva jännite, jolloin myös lamppuvirta muuttuu. Tämä aiheuttaa muutoksia lampputehossa. Lampputehon muutoksesta on seurauksena purkausputken höyrynpaineen muuttuminen. Höyrynpaineen muuttuessa muuttuu lamppujännite. Monimetallilampun lamppujännitteen suuruuden määrää pääasiassa purkausputkessa olevan elohopean höyrynpaine. Tällä lampulla, kuten monimetallilampuilla yleensä, ovat muutokset lamppujännitteessä suhteellisen pieniä syöttöjännitteen muutoksista huolimatta. Tämä johtuu siitä, että purkausputkessa kaikki elohopea on lampun toiminnan aikana höyrystyneenä, jolloin muutokset elohopean höyrynpaineessa ja siten lamppujännitteessä ovat

suhteellisen pieniä. Lampputehomuutokset aiheuttavat muutoksia lampun valovirrassa. Lisäksi lampputehomuutoksista johtuvasta purkausputken lämpötilan muuttumisesta on seurauksena purkaukseen osallistuvien aineiden höyrynpaineen koostumuksen muuttuminen. Tästä seuraa muutoksia lampun väriominaisuuksissa (luku 5.1.2). Kuvassa 8.3 a on esitetty mittaustuloksista saadut lampputehon, lamppuvirran ja lamppujännitteen suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona.

Kuvassa 8.3 b on esitetty lampun valovirran, valotehokkuuden ja värilämpötilan suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona. Valotehokkuuden arvot tässä ja seuraavissa tarkasteluissa on saatu jakamalla lampun valovirta liitäntälaitteen ja lampun kokonaisteholla. Alijännitteellä lampun valovirta laskee lampputehoa voimakkaammin, jolloin myös valotehokkuus laskee. Lampun värilämpötila kasvaa syöttöjännitteen laskiessa. Värilämpötilan muutokset ovat suhteellisen suuria. Jo syöttöjännitteen vaihtelualueella 210 - 230 V ($\pm 5\%$ liitäntälaitteen nimellisjännitteestä) muuttuu värilämpötila - 4 % ... + 8 %, mikä vastaa kokonaismuutosta 571 K nimellisjännitteellä mitatusta arvosta. Kun valovirta on laskenut noin 60 %:iin nimellisjännitettä vastaavasta arvostaan on värilämpötila noussut 24 % eli 1132 K.

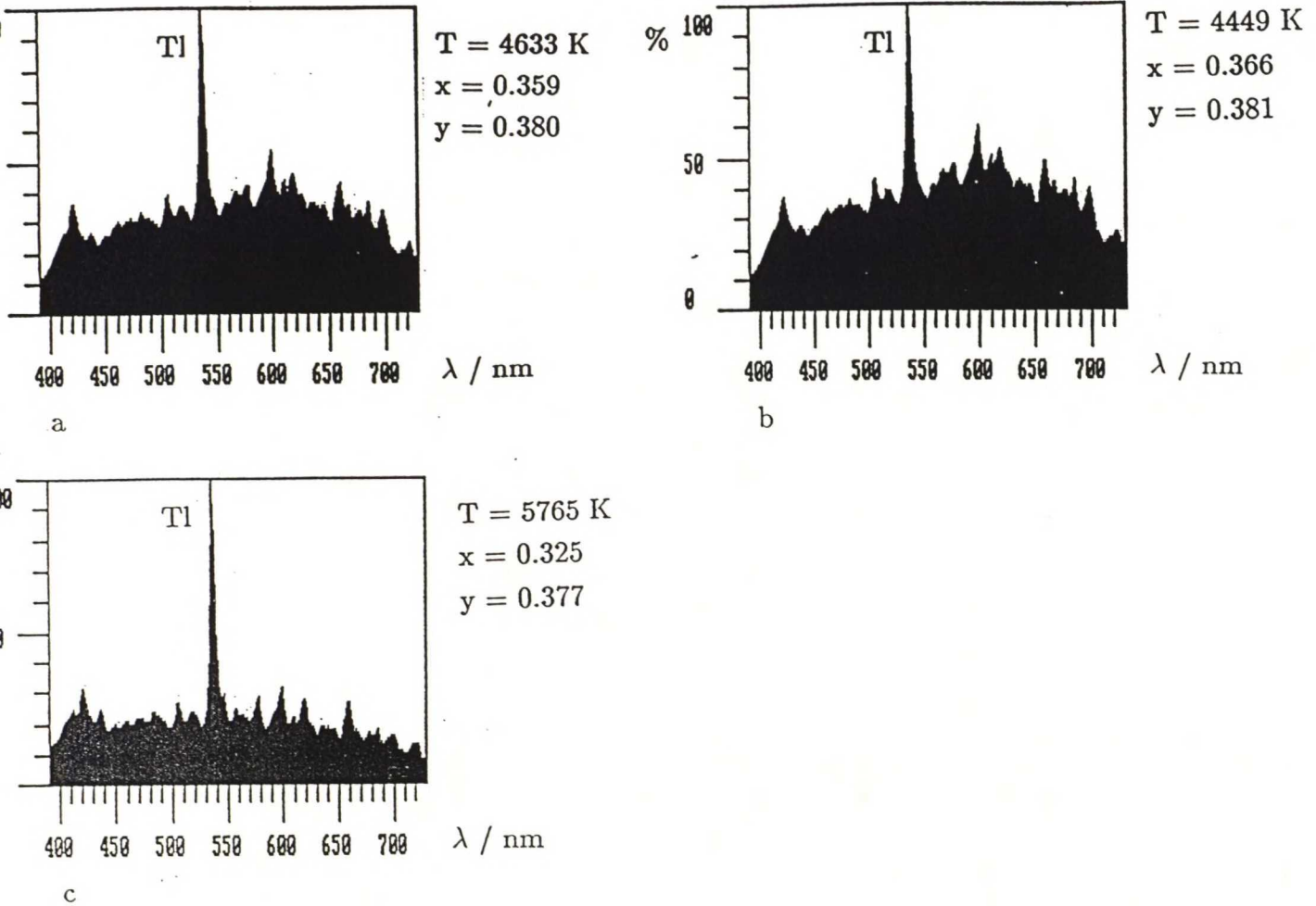
Lampun polttoasennon ollessa pystysuora (taulukko 8.2, mittaukset 6. - 8), eivät lampun sähköiset suureet poikenneet merkittävästi vaakasuoran polttoasennon vastaavista suureista. Valovirrassa tapahtui pieniä muutoksia, samoin värilämpötilassa.



Kuva 8.3 Monimetallilampun Osram HQI-E 250/D

- a) lamppujännite, lamppuvirta ja lampputeho sekä
b) valotehokkuus, valovirta ja värilämpötila
syöttöjännitteen funktiona.

Kuvassa 8.4 on esitetty lampun mitatut säteilyn spektrijakaumat kolmella eri syöttöjännitteen arvolla (vaakasuora polttoasento). Kuviin on merkitty mitatut värikoordinaattien arvot sekä mitattu värilämpötila. Spektrijakaumat ovat suhteellisia. Tästä johtuen ei eri mittausten spektrikuvia voida käyttää valonlähteen todellisten, kullakin aallonpituudella esiintyvien säteilyvoimakkuuksien vertaamiseen eri syöttöjännitteen arvoilla. Tässä lampussa valoa tuottavina aineina ovat dysprosium (Dy) ja tallium (Tl). Kuvassa 8.4 a on refernssikuristimen nimellisjännitteellä 220 V mitattu säteilyn spektri. Dysprosiumille on ominaista useat spektriviivat koko näkyvän valon alueella, jolloin spektri saa jatkuvan luonteen. Tallium synnyttää spektriviivan vihreälle alueelle aallonpituudella 535 nm. Syöttöjännitteen kasvaessa arvoon 230 V, kuva 8.4 b, lisääntyy dysprosiumin säteily eniten spektrin punaisella alueella. Säteilyn värilämpötila laskee. Kun syöttöjännite laskee arvoon 190 V, kuva 8.4 c, heikkenee dysprosiumin säteily eniten spektrin punaisella alueella. Lampun värilämpötila kasvaa.



Kuva 8.4 Monimetallilampun Osram HQI-E 250/D spektrijakaumat syöttöjännitteen arvoilla
 a) 220 V, b) 230 V ja c) 190 V.

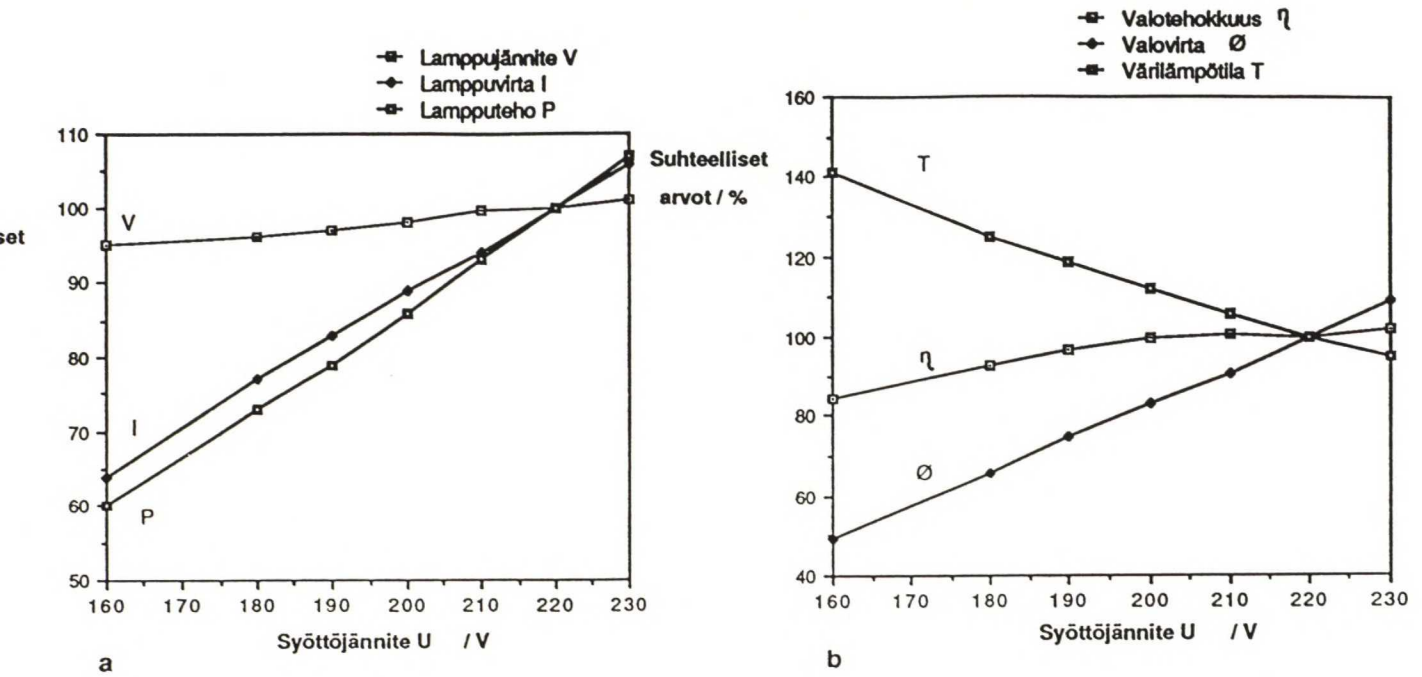
8.2.2.2 Monimetallilamppu Osram HQI-TS 150/WDL

Taulukossa 8.3 on esitetty monimetallilampun Osram HQI-TS 150/WDL mitaustulokset. Mittaukset suoritettiin syöttöjännitteen arvoilla 160 - 230 V. Valmistaja ilmoittaa lampun polttoasennon olevan vaakasuora, josta sallittu poikkeama on $\pm 45^\circ$. Mittaukset suoritettiin vaakasuorassa polttoasennossa. Referenssikuristimen nimellijännitteellä mitattu lampputeho (144.4 W) on hieman alhaisempi kuin valmistajan ilmoittama lampun nimellisteho (150 W). Nimellijännitteellä mitattu valovirta (10 707 lm) on myös hieman alhaisempi kuin valmistajan ilmoittama valovirta (11 000 lm). Nimellijännitteellä mitattu värielämytilan arvo (3090 K) on hyvin lähellä valmistajan ilmoittamaa värielämytilaa (3000 K).

Taulukko 8.3 Monimetallilampun Osram HQI-TS 150/WDL (3000 K) mitaustulokset mittausten suoritusjärjestyksessä (N:o). Syöttöjännite U , lampuvirta I , lampun ja liitäntälaitteen kokonaisteho P_k , lamppujännite V , lampputeho P , valovirta ϕ , värikoordinaatit x ja y sekä värilämpötila T .

N:o	U / V	I / A	P_k / W	V / V	P / W	Φ / lm	x	y	T / K
1.	220	1.83	169.0	90.8	144.4	10 707	0.424	0.387	3090
2.	230	1.94	181.6	91.4	154.4	11 693	0.431	0.386	2944
3.	210	1.72	153.2	90.4	133.6	9 796	0.415	0.388	3268
4.	200	1.62	139.5	89.4	123.8	8 862	0.406	0.389	3456
5.	190	1.51	129.9	87.7	113.8	7 982	0.398	0.389	3663
6.	180	1.40	119.4	87.5	104.7	7 039	0.389	0.389	3873
7.	160	1.17	97.2	86.2	86.5	5 194	0.369	0.385	4357

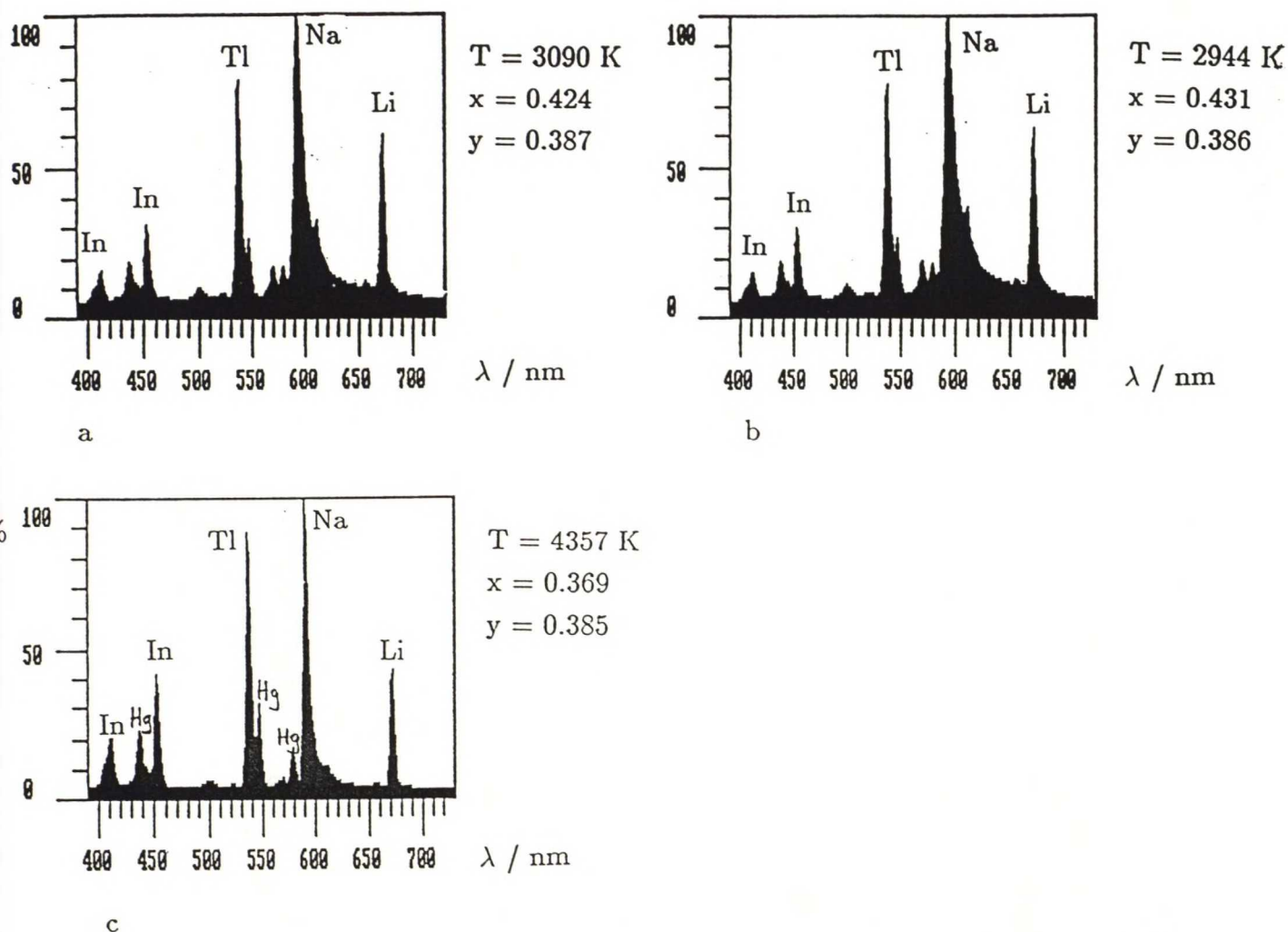
Kuvassa 8.5 a on esitetty lampputehon, lamppuvirran ja lamppujännitteen suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona. Lamppujännitteen muutokset ovat edellä esitetyn mukaisesti suhteellisen pieniä lamppuvirran ja lampputehon muutoksista huolimatta. Kuvassa 8.5 b on esitetty valovirran, valotehokkuuden ja värilämpötilan suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona. Syöttöjännitteen laskiessa laskee valovirta lampputehoa voimakkaammin, jolloin myös valotehokkuus laskee. Värilämpötila nousee syöttöjännitteen laskiessa. Kun valovirta on laskenut noin 50 % nimellisjännitettä vastaavasta arvostaan on värilämpötila noussut 40 % eli 1267 K.



Kuva 8.5 Monimetallilampun Osram HQI-TS 150/WDL

- a) lamppujännite, lamppuvirta ja lampputeho sekä
b) valotehokkuus, valovirta ja väriämpötila
syöttöjännitteen funktiona.

Kuvassa 8.6 on esitetty lampun mitatut säteilyn spektrijakaumat kolmella eri syöttöjännitteen arvolla. Tämän monimetallilampun valontuotto perustuu tinnan (Sn), natriumin (Na), talliumin (Tl), indiumin (In) sekä litiumin (Li) lähettämään säteilyyn. Kuvassa 8.6 a on referenssikuristimen nimellisjännitteellä 220 V mitattu säteilyn spektri. Kuvaan on merkitty eri metallien tuottamat spektriviivat. Tinalle on ominaista jatkuva spektri, mikä näkyy kuvassa säteilyinä koko spektrin alueella. Syöttöjännitteen noustessa, kuva 8.6 b, lisääntyy spektrin punaisen alueen säteily hieman, jolloin väriämpötila laskee. Kuvan 8.6 c spektri vastaa syöttöjännitteen arvoa 160 V. Spektrin punainen osuus on heikentynyt eniten. Litiumin spektriviiva (670 nm) on heikentynyt suhteessa muihin spektriviivoihin. Elohopean (Hg) spektriviivat ovat alkaneet selvemmin erottua spektrissä. Väriämpötila on noussut.



Kuva 8.6 Monimetallilampun Osram HQI-TS 150/WDL mitatut säteilyn spektrit syöttöjännitteen arvoilla
a) 220 V, b) 230 V ja c) 160 V.

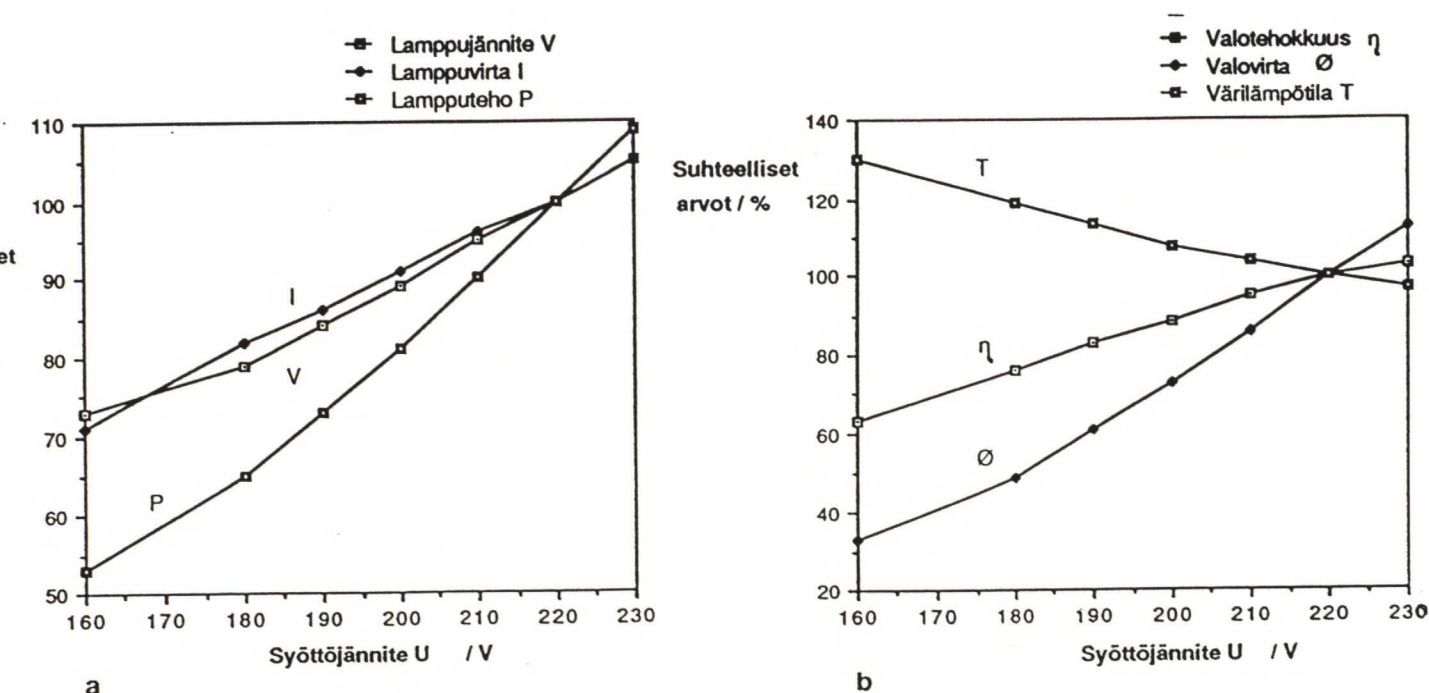
8.2.2.3 Monimetallilamppu Osram HQI-TS 150/NDL

Taulukossa 8.4 on esitetty monimetallilampun HQI-TS 150/NDL mittaustulokset. Mittaukset suoritettiin syöttöjännitteen arvoilla 160 - 230 V. Valmistaja ilmoittaa lampun polttoasennon olevan vaakasuora, josta sallittu poikkeama on $\pm 45^\circ$. Mittaukset suoritettiin vaakasuorassa polttoasennossa. Referenssikuristimen nimellisjännitteellä mitattu lampputeho (147.1 W) on hieman alhaisempi kuin valmistajan ilmoittama lampun nimellisteho (150 W). Nimellisjännitteellä mitattu valovirta (12 572 lm) on valmistajan ilmoittamaa valovirtaa (11 250 lm) suurempi. Nimellisjännitteellä mitattu värilämpötila (4250 K) ei merkittävästi poikkea valmistajan ilmoittamasta värilämpötilasta (4300 K).

Taulukko 8.4 Monimetallilampun Osram HQI-TS 150/NDL (4300 K) mittaustulokset mittausten suoritusjärjestyksessä (N:o). Syöttöjännite U , lampuvirta I , lampun ja liitälaitteen kokonaisteho P_k , lamppujännite V , lamputeho P , valovirta ϕ , värikoordinaatit x ja y sekä värilämpötila T .

N:o	$U /$ V	$I /$ A	$P_k /$ W	$V /$ V	$P /$ W	$\Phi /$ lm	x	y	$T /$ K
1.	220	1.82	168.1	93.9	147.1	12 572	0.368	0.362	4250
2.	230	1.91	183.6	98.6	160.5	14 163	0.373	0.363	4113
3.	210	1.74	151.9	89.0	133.0	10 778	0.364	0.365	4402
4.	200	1.65	136.6	84.0	119.6	9 118	0.359	0.368	4582
5.	190	1.57	122.3	79.2	107.3	7 607	0.352	0.371	4828
6.	180	1.49	109.0	74.2	95.7	6 179	0.345	0.379	5073
7.	160	1.30	88.0	68.5	77.6	4 171	0.332	0.401	5505

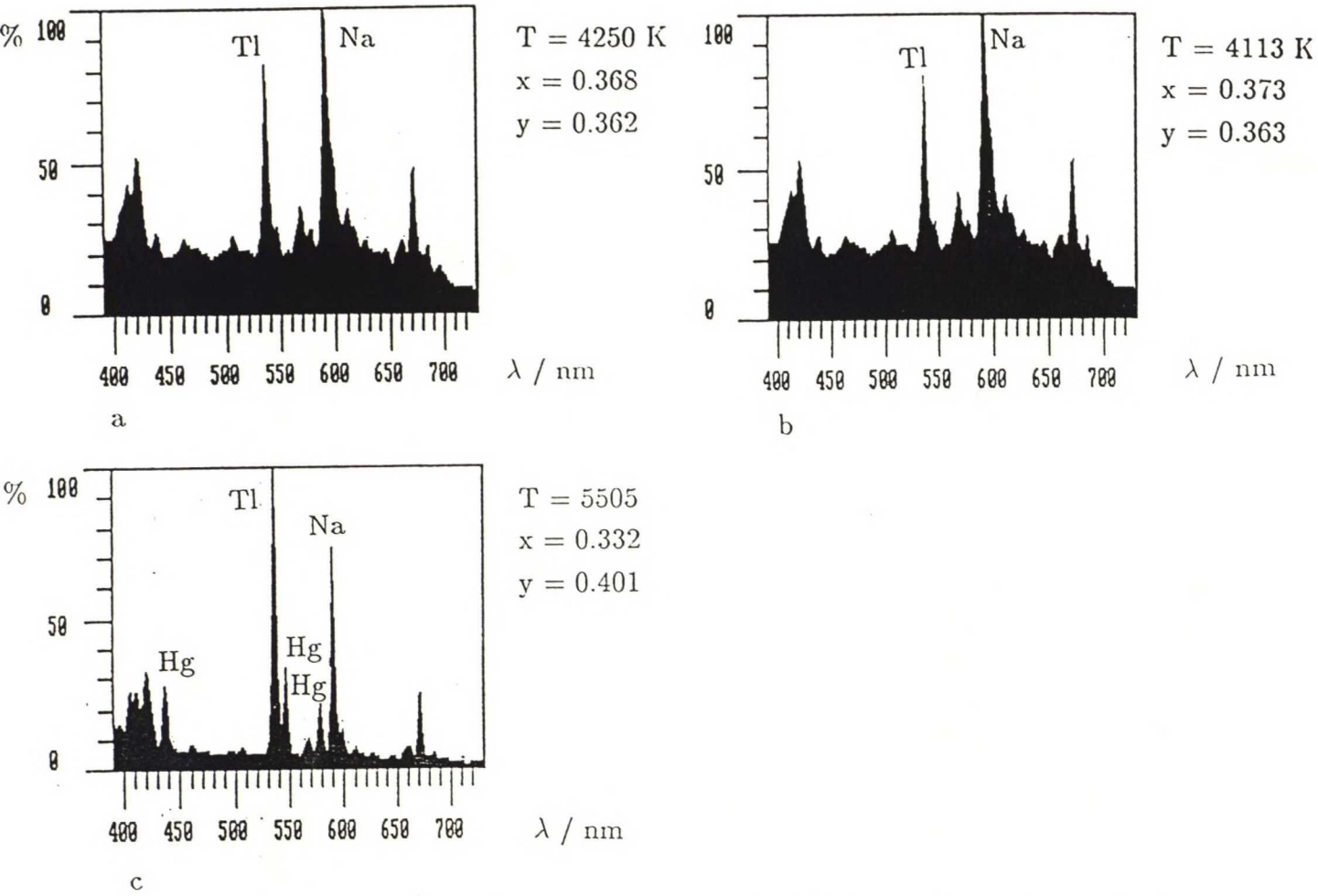
Kuvassa 8.7 a on esitetty lampputehon, lamppuvirran ja lamppujännitteen suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona. Kuvassa 8.7 b on esitetty valovirran, valotehokkuuden sekä värilämpötilan suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona. Kuten edellä käsitellyillä lampuilla, laskee lampun valovirta syöttöjännitteen laskiessa lampputehoa voimakkaammin, jolloin myös valotehokkuus laskee. Värilämpötilan suhteelliset muutokset olivat tällä lampulla muita monimetallilamppuja hieman pienemmät. Syöttöjännitteen vaihdellessa alueella 210 - 230 V ($\pm 5\%$ liitälaitteen nimellisjännitteestä) muuttui värilämpötila - 3 % ... + 4 % nimellisjännitettä vastaavasta arvosta kokonaismuutoksen ollessa 289 K. Alhaisimmilla syöttöjännitteen arvoilla ovat muutokset värilämpötilassa kuitenkin jo silmin havaittavia. Kun valovirta on laskenut noin 50 % nimellisjännitettä vastaavasta arvostaan on värilämpötila noussut 19 % eli 823 K.



Kuva 8.7 Monimetallilampun HQI-TS 150/NDL

- a) lamppujännite, lamppuvirta ja lampputeho sekä
b) valotehokkuus, valovirta ja värilämpötila
syöttöjännitteen funktiona.

Kuvassa 8.8 on esitetty lampun mitatut säteilyn spektrijakaumat kolmella eri syöttöjännitteen arvolla. Tämän lampun valontuotto perustuu dysprosiumin (Dy), holmiumin (Ho), talliumin (Tl) sekä natriumin (Na) lähettämään säteilyyn. Kuvassa 8.8 a on referenssikuristimen nimellisarvolla 220 V mitattu säteilyn spektri. Dysprosiumille ja holmiumille ovat ominaisia useat spektriviivat koko näkyvän valon alueella, jolloin spektri saa jatkuvan luonteen. Tallium lisää spektrin vihreän alueen osuutta spektriviivallaan 535 nm ja natrium lisää keltaisen alueen osuutta spektriviivoillaan 589.0nm ja 589.6 nm. Syöttöjännitteen kasvaessa, kuva 8.8 b, värilämpötila laskee hieman. Syöttöjännitteen laskiessa, kuva 8.8 c, talliumin lähettämä säteily vihreällä alueella (535 nm) voimistuu suhteessa muiden metallien lähettämään säteilyyn. Elohopean (Hg) spektriviivat alkavat erottua selvemmin spektrissä. Purkauksen säteily heikkenee eniten spektrin punaisella alueella, jolloin värilämpötila nousee.



Kuva 8.8 Monimetallilampun Osram HQI-TS 150/NDL mitatut säteilyn spektrit syöttöjännitteen arvoilla
a) 220 V, b) 230 V ja c) 160 V.

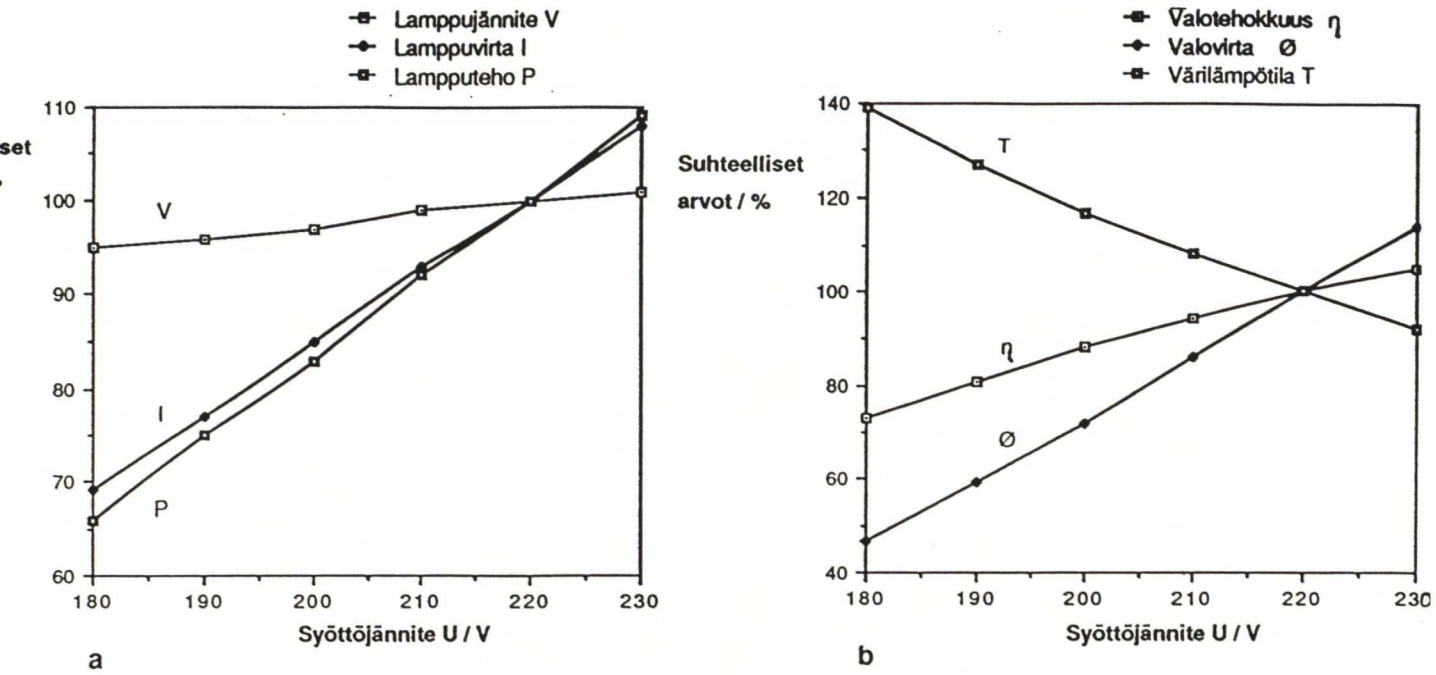
8.2.2.4 Monimetallilamppu Philips HPI-T 250 W

Taulukossa 8.5 on esitetty monimetallilampun Philips HPI-T 250 W mittaustulokset. Mittaukset suoritettiin syöttöjännitteen arvoilla 180 - 230 V. Valmistaja ilmoittaa lampun polttoasennon olevan vaakasuora, josta sallittu poikkeama on $\pm 20^\circ$. Mittaukset suoritettiin vaakasuorassa polttoasennossa. Referenssikuristimen nimellijännitteellä mitattu lampputeho (243.3 W) on hieman alhaisempi kuin valmistajan ilmoittama lampun nimellisteho (250 W). Nimellijännitteellä mitattu valovirta (15 239 lm) on huomattavasti alhaisempi kuin valmistajan ilmoittama valovirta (17 000 lm). Samoin nimellijännitteellä mitattu värilämpötilan arvo (5003 K) poikkeaa huomattavasti valmistajan ilmoittamasta värilämpötilasta (4100 K).

Taulukko 8.5 Monimetallilampun Philips HPI-T 250 W mittaustulokset mitausten suoritusjärjestyksessä (N:o). Syöttöjännite U , lamppuvirta I , lampun ja liitäntälaitteen kokonaisteho P_k , lamppujännite V , lampputeho P , valovirta ϕ , värikoordinaatit x ja y sekä värilämpötila T .

N:o	$U /$ V	$I /$ A	$P_k /$ W	$V /$ V	$P /$ W	$\Phi /$ lm	x	y	$T /$ K
1.	220	2.06	272.7	131.1	243.4	15 239	0.348	0.389	5003
2.	230	2.22	297.1	132.8	264.2	17 442	0.362	0.391	4605
3.	210	1.91	248.7	129.2	222.8	13 075	0.334	0.385	5428
4.	200	1.75	224.5	127.4	202.3	11 016	0.322	0.384	5857
5.	190	1.59	200.6	125.6	181.7	9 054	0.308	0.379	6369
6.	180	1.42	175.6	124.6	160.2	7 128	0.296	0.373	6931

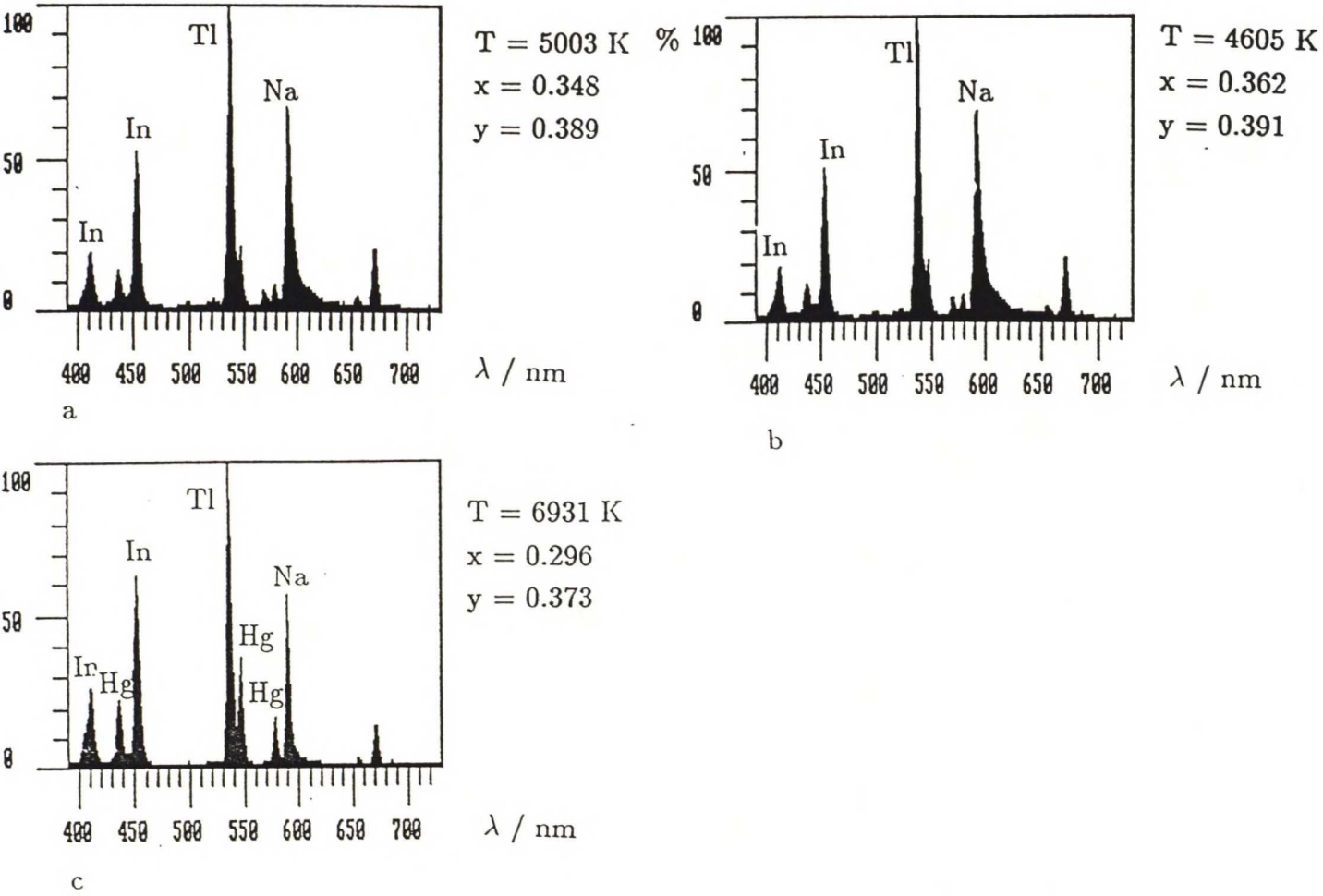
Kuvassa 8.9 a on esitetty lampputehon, lamppuvirran ja lamppujännitteen suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona. Myös tällä lampulla ovat lamppujännitteen muutokset edellä esitetyn mukaisesti suhteellisen pieniä lamppuvirran ja lampputehon muutoksista huolimatta. Kuvassa 8.9 b on esitetty valovirran, valotehokkuuden ja värilämpötilan suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona. Alijännitteellä valovirta laskee lampputehoa voimakkaammin, jolloin myös valotehokkuus laskee. Värilämpötilan muutokset ovat melko suuria. Syöttöjännitteen vaihdellessa alueella 210 - 230 V ($\pm 5\%$ liitäntälaitteen nimellisjännitteestä) muuttuu värilämpötila - 8 % ... + 8 % nimellisjännitettä vastaavasta arvostaan, jolloin kokonaismuutos värilämpötilassa on 823 K. Kun valovirta on laskenut noin 50 % nimellisjännitettä vastaavasta arvostaan on värilämpötila noussut 39 % eli 1928 K.



Kuva 8.9 Monimetallilampun Philips HPI-T 250 W

- a) lamppujännite, lamppuvirta ja lampputeho sekä
b) valotehokkuus, valovirta ja värilämpötila
syöttöjännitteen funktiona.

Kuvassa 8.10 on esitetty lampun mitatut säteilyn spektrit kolmella eri syöttöjännitteen arvolla. Tämän lampun valontuotto perustuu natriumin (Na), talliumin (Tl) ja indiumin (In) lähettämään säteilyyn. Kuvan 8.10 a on referenssikuristimen nimellisjännitteellä 220 V mitattu säteilyn spektri. Spektri on selvästi epäjatkua. Natriumin synnyttämät spektriviivat 589.0 nm ja 589.6 nm ovat keltaisella alueella, talliumin spektriviiva 535 nm on vihreällä alueella ja indiumin spektriviivoista 451 nm on sinisellä alueella sekä 410 nm violetilla alueella. Kuvassa 8.10 b on säteilyn spektri syöttöjännitteen ollessa 230 V. Purkaukseen osallistuvien natriumin, talliumin ja indiumin höyrynpaineen koostumuksen muuttuessa spektrin punainen osuus voimistuu hieman ja värilämpötila laskee. Kun syöttöjännitteen arvo on 180 V, kuva 8.10 c, alkavat elohopean (Hg) spektriviivat erottua selvemmin spektrissä. Myös varsinaisten valoa tuottavien aineiden spektriviivojen voimakkuuksien keskinäinen suhde muuttuu. Spektrin punainen osuus heikkenee ja värilämpötila kasvaa.



Kuva 8.10 Monimetallilampun Philips HPI-T 250 W säteilyn spektrit syöttöjännitteen arvoilla
a) 220 V, b) 230 V ja c) 180 V.

8.2.2.5 Monimetallilamppu GE Halarc 32 W

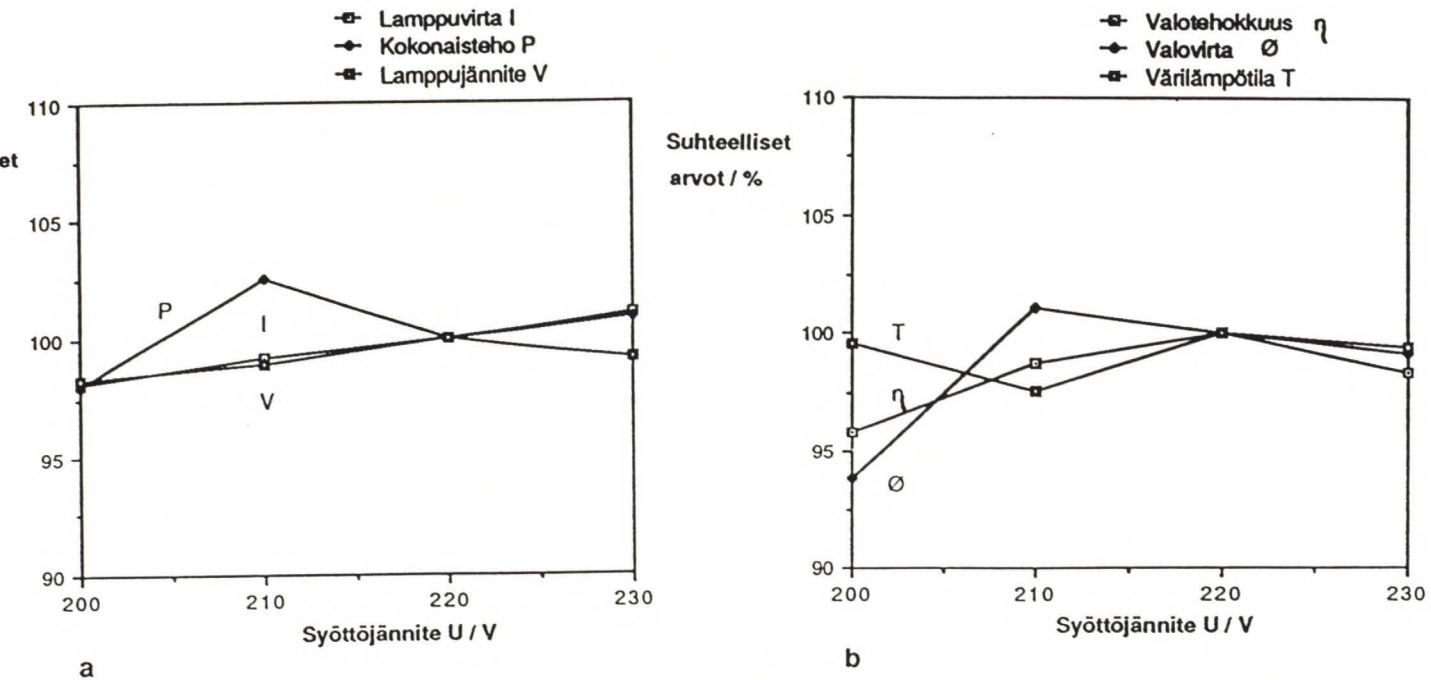
Taulukossa 8.6 on esitetty monimetallilampun GE Halarc 32 W mittaustulokset. Koska lampun elektronisen liitälaitteen sallittu jännitealue on $220 \pm 10\%$, suoritettiin mittaukset syöttöjännitealueella 200 - 230 V. Valmistajan ilmoittama lampun polttoasento on pystysuora (kanta ylöspäin), josta sallittu poikkeama on $\pm 15^\circ$. Mittaukset suoritettiin pystysuorassa polttoasennossa. Elektronisen liitälaitteen aiheuttaman poikkeavan mittauskytkennän johdosta ei tämän lampun lampputehoa mitattu. Liitälaitteen nimellisjännitteellä mitattu lampun ja liitälaitteen kokonaisteho (42.29 W) on hieman suurempi kuin valmistajan ilmoittama kokonaisteho (39 W). Nimellisjännitteellä mitattu valovirta (2711 lm) on suurempi kuin valmistajan ilmoittama valovirta

(2500 lm). Nimellisjänniteellä mitattu värilämpötila (2698 K) on alhaisempi kuin valmistajan ilmoittama värilämpötila (3000 K).

Taulukko 8.6 Monimetallilampun GE Halarc 32 W mittaustulokset mittaus-
ten suoritusjärjestyksessä (N:o). Syöttöjännite U , liitäntälaitteen verkosta
ottama virta I_v , liitäntälaitteen verkosta ottama teho P_k , lamppujännite V ,
lamppuvirta I , värikoordinaatit x ja y sekä värilämpötila T .

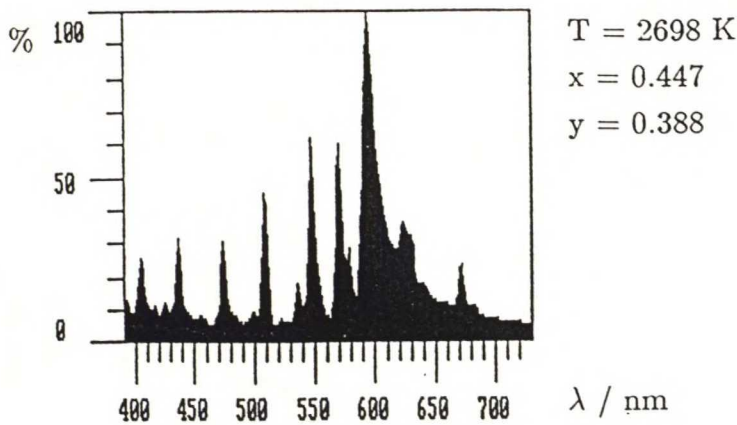
N:o	$U /$ V	$I_v /$ A	$P_k /$ W	$V /$ V	$I /$ A	$\Phi /$ lm	x	y	$T /$ K
1.	220	0.193	42.29	95.50	0.370	2711	0.447	0.388	2698
2.	230	0.188	42.65	94.72	0.374	2686	0.447	0.385	2682
3.	210	0.208	43.33	94.45	0.367	2742	0.450	0.384	2633
4.	200	0.213	41.43	93.90	0.363	2542	0.445	0.382	2688

Lampu elektroninen liitäntälaite pyrkii pitämään lamppujännitteen tasaisena syöttöjännitteen vaihteluista huolimatta. Tämä näkyi mittauksissa eri syöttöjännitteen arvoilla jatkuvasti vaihtelevana lamppujännitteen arvona lamppujännitteen vaihdellessa noin ± 1 V kirjatun arvon ympärillä. Lamppuvirta pysyi mittauksissa eri syöttöjännitteen arvoilla lähes vakiona. Koska muutokset lamppuvirrassa ja lamppujännitteessä ja siten myös lampputehossa ovat suhteellisen pieniä, säilyy myös valovirta melko tasaisena. Myöskään purkausputken lämpötilassa ei tapahdu muutoksia, jolloin purkausputken täytösaineiden höyrynpaineen koostumus ja siten myös säteilyn värilämpötila säilyvät muuttumattomina. Kuvassa 8.11 a on esitetty liitäntälaitteen verkosta ottaman kokonaistehon, lamppuvirran ja lamppujännitteen suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona ja kuvassa 8.11 b on esitetty valovirran, valotehokkuuden ja värilämpötilan suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona. Kuvassa 8.12 on esitetty liitäntälaitteen nimellisjänniteellä mitattu säteilyn spektri. Muilla syöttöjännitteen arvoilla mitatuissa spektreissä ei esiintynyt huomattavia eroavuuksia em. spektrikuvaan nähden. Lamppu on skandium-pohjainen.



Kuva 8.11 Monimetallilampun GE Halarc 32 W

- a) kokonaisteho, lamppuvirta ja lamppujännite sekä
b) valotehokkuus, valovirta ja värilämpötila syöttöjännitteen funktiona.



Kuva 8.12 Monimetallilampun GE Halarc 32 W säteilyn spektri 220 V syöttöjännitteellä.

8.2.2.6 Yhteenveto monimetallilamppumittauksista

Mittauksissa oli mukana viisi erityyppistä monimetallilamppua. Liitäntälaitteiden nimellisjännitteellä mitatut lamppujen valovirrat poikkesivat eri lamppuilla valmistajien ilmoittamista arvoista. Monimetallilampun Osram HQI-TS

150/NDL liitäntälaitteen nimellisjännitteellä mitattu valovirta 12 572 lm on valmistajan ilmoittamaa valovirtaa 11 250 lm suurempi. Monimetallilampun Philips HPI-T 250 W nimellisjännitteellä mitattu valovirta 15 239 lm on huomattavasti alhaisempi kuin valmistajan ilmoittama valovirta 17 000 lm. Monimetallilampun GE Halarc 32 W nimellisjännitteellä mitattu valovirta 2711 lm on suurempi kuin valmistajan ilmoittama valovirta 2500 lm. Muilla monimetallilampuilla nimellisjännitteellä mitatut valovirrat eivät suuresti poikkea valmistajan ilmoittamista arvoista.

Liitäntälaitteiden nimellisjännitteellä mitatut värilämpötilan arvot poikkesivat muutamilla lampuilla huomattavastikin valmistajan ilmoittamista värilämpötilan arvoista. Monimetallilampun Osram HQI-E 250/D nimellisjännitteellä mitattu värilämpötila 4633 K on huomattavasti alhaisempi kuin valmistajan ilmoittama värilämpötila 5400 K. Monimetallilampun Philips HPI-T 250 W nimellisjännitteellä mitattu värilämpötila 5003 K on huomattavasti korkeampi kuin valmistajan ilmoittama arvo 4100 K. Monimetallilampun GE Halarc 32 W nimellisjännitteellä mitattu värilämpötila 2698 K on alhaisempi kuin valmistajan ilmoittama arvo 3000 K.

Monimetallilampuille ovat ominaisia voimakkaat valon värimuutokset syöttöjännitettä säädettäessä. Taulukossa 8.7 on esitetty eri syöttöjännitteen arvoilla mitatut lamppujen värilämpötilan muutokset nimellisjännitteellä mitatusta värilämpötilan arvosta. Värilämpötilan muutokset ovat melko suuria jo syöttöjännitteen vaihtelualueella $\pm 5\%$ liitäntälaitteen nimellisjännitteestä. Poikkeuksen muodostaa 32 W elektronisella liitäntälaitteella varustettu lamppu. Tämän lampun elektronisen liitäntälaitteen ansiosta lampun sähköiset arvot ja siten myös väriominaisuudet säilyvät lähes muuttumattomina syöttöjännitteen ollessa liitäntälaitteen sallitulla jännitealueella.

Taulukko 8.7 Eri syöttöjännitteen U arvoilla mitatut monimetallilamppujen värilämpötilan muutokset ΔT . Värilämpötilan muutokset esitetty muutoksina syöttöjännitteen arvolla 220 V (liitäntälaitteiden nimellisjännite) mitatusta värilämpötilan arvosta. Syöttöjännitteen arvon lisäksi esitetty syöttöjännitteen prosentuaalinen muutos nimellisjännitteestä 220 V.

Lampputyyppi	$U=230\text{ V (+5\%)}\Delta T$	$U=210\text{ V (-5\%)}\Delta T$	$U=200\text{ V (-10\%)}\Delta T$
Osram HQI-E 250/D	– 184 K	+ 387 K	+ 781 K
Osram HQI-TS 150/WDL	– 146 K	+ 178 K	+ 366 K
Osram HQI-TS 150/NDL	– 137 K	+ 152 K	+ 332 K
Philips HPI-T 250 W	– 398 K	+ 425 K	+ 854 K
GE Halarc 32 W	– 16 K	– 65 K	– 10 K

Elektronisella liitäntälaitteella varustetun 32 W monimetallilampun mittauksissa ei alitettu syöttöjännitteen arvoa 200 V liitäntälaitteen rajoitetusta jännitealueesta johtuen. Muita monimetallilamppuja säädettiin noin 50 - 60 % valotasolle asti. Näin alhaisilla valovirran arvoilla olivat lamppujen valon värimuutokset jo varsin suuria. Kaikkien monimetallilamppujen värilämpötila kasvoi syöttöjännitteen ja valovirran laskiessa. Valovirran säätöalueella 50 - 100 % olivat monimetallilampun Osram HQI-TS 150/NDL värilämpötilan suhteelliset ja absoluuttiset muutokset pienimmät muihin samalle tasolle säädettyihin monimetallilamppuihin verrattuna.

8.2.2.7 Värikorjattu suurpainenatriumlamppu

Philips SON-T Comfort 250 W

Taulukossa 8.8 on esitetty värikorjatun suurpainenatriumlampun Philips SON-T Comfort 250 W ($R_a = 60$) mittaustulokset. Lampun polttoasennon ollessa pystysuora mittaukset suoritettiin syöttöjännitteen arvoilla 170 - 230 V. Vaakasuurassa polttoasennossa mittaukset suoritettiin syöttöjännitteen arvoilla 210 - 230 V. (Lampun polttoasento on vapaa.) Pystysuorassa polttoasennossa referenssikuristimen nimellisjännitteellä mitattu valovirta (24 769 lm) on suurempi kuin valmistajan ilmoittama valovirta (22 000 lm). Vaakasuurassa polttoasennossa nimellisjännitteellä mitattu valovirta (22 959 lm) on hieman valmistajan

ilmoittamaa arvoa suurempi. Eri polttoasentoissa nimellisjännitteellä mitatut värilämpötilat (2143 K ja 2108 K) ovat hyvin lähellä valmistajan ilmoittamaa värilämpötilan arvoa (2150 K).

Taulukko 8.8 Värikorjatun suurpainenatriumlampun Philips SON-T Comfort 250 W mittaustulokset mittausten suoritusjärjestyksessä (N:o). Syöttöjännite U , lamppuvirta I , lampun ja liitäntälaitteen kokonaisteho P_k , lamppujännite V , lampputeho P , valovirta ϕ , värikoordinaatit x ja y sekä värilämpötila T .

Polttoasento: pystysuora, kanta ylös.

N:o	U / V	I / A	P_k / W	V / V	P / W	Φ / lm	x	y	T / K
1.	220	3.01	275.1	93.5	240.8	24 769	0.515	0.419	2143
2.	230	3.06	308.9	105.9	273.6	26 316	0.506	0.418	2215
3.	210	2.95	243.1	81.2	208.1	22 661	0.523	0.420	2068
4.	200	2.86	213.9	72.4	181.2	20 089	0.526	0.424	2066
5.	190	2.74	188.4	65.3	157.8	17 534	0.529	0.427	2067
6.	180	2.69	151.9	50.1	120.8	12 977	0.534	0.429	2036
7.	170	2.57	131.8	43.9	101.9	10 107	0.539	0.427	1986

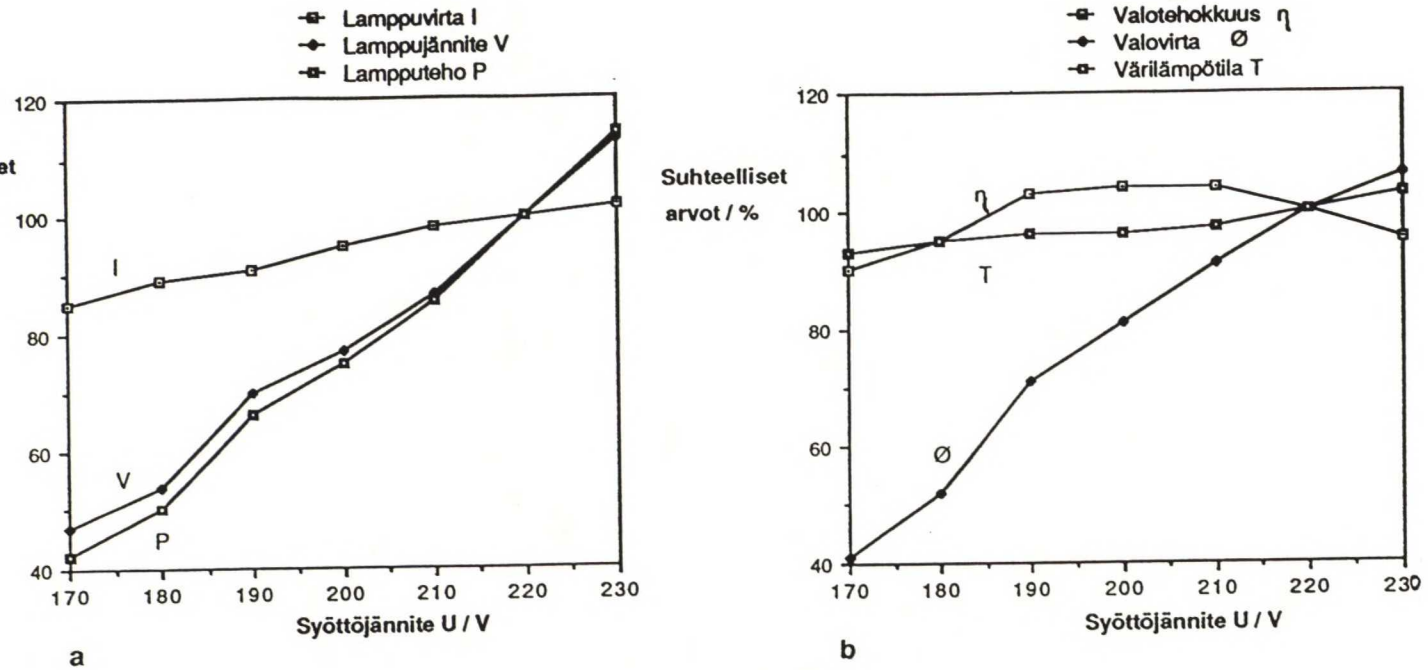
Polttoasento: vaakasuora.

N:o	U / V	I / A	P_k / W	V / V	P / W	Φ / lm	x	y	T / K
8.	220	2.90	284.3	101.8	251.2	22 959	0.518	0.419	2108
9.	230	2.97	314.3	112.2	280.2	24 261	0.513	0.417	2143
10.	210	2.74	260.1	99.7	231.0	21 027	0.522	0.420	2080

Kuvassa 8.13 a on esitetty lampputehon, lamppuvirran ja lamppujännitteen suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona (pystysuora polttoasento). Syöttöjännitteen muuttuessa muuttuu kuristimen yli oleva jännite, josta on

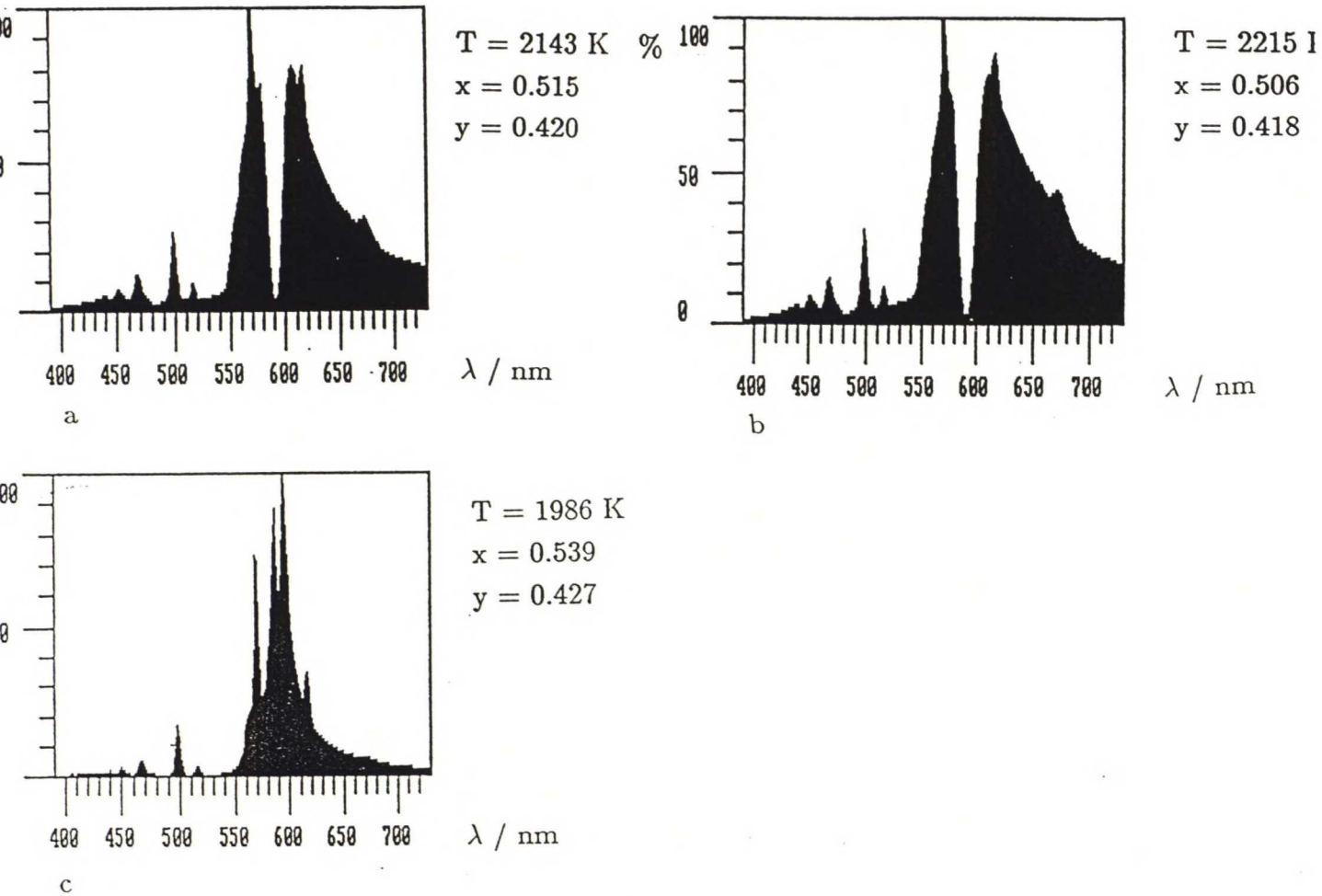
seurauksena lamppuvirran muuttuminen. Tämä aiheuttaa muutoksia lampputehossa. Lampputehon muutoksista on seurauksena purkausputken lämpötilan ja siten myös höyrinpaineen muuttuminen. Suurpainenatriumlampun lampputähtäimen määrää elohopean höyrinpaineen ohella natriumin höyrinpaine. Muutokset purkausputkessa olevan natriumin ja elohopean höyrinpaineessa aiheuttavat muutoksia lampputähtäimessä. Syöttötähtäimen muutoksien aiheuttamat muutokset lampputähtäimessä ovat suurpainenatriumlampulla suuremmat kuin monimetallilampulla. Tämä johtuu suurpainenatriumlampun purkausputkessa olevasta höyrystymättömästä elohopea-natrium-seoksesta (luku 5.1.3). Lampputehomuutoksista on seurauksena myös valovirran muuttuminen.

Kuvassa 8.13 b on esitetty mittaustuloksista (lampun polttoasento pystysuora) saadut lampun valovirran, valotehokkuuden ja värielämpötilan suhteelliset muutokset syöttötähtäimen funktiona. Ylihähtäimellä lampputeho kasvaa valovirtaa voimakkaammin, jolloin valotehokkuus laskee. Syöttötähtäimen laskiessa pienenee lampputeho aluksi valovirtaa voimakkaammin, jolloin valotehokkuus kasvaa hieman. Syöttötähtäimen edelleen laskiessa alkaa valovirta pienentyä lampputehoa voimakkaammin, jolloin valotehokkuus alkaa laskea. Syöttötähtäimen laskiessa laskee lampun värielämpötila hieman. Syöttötähtäimen arvolla 170 V on valovirta laskenut noin 40 %:iin nimellishähtäimettä vastaavasta arvostaan. Tällöin on värielämpötila laskenut 7 % nimellishähtäimettä vastaavasta arvostaan muutoksen ollessa 157 K.



Kuva 8.13 Värikorjatun suurpainenatriumlampun Philips SON-T Comfort 250 W
a) lamppuvirta, lamppujännite ja lampputeho sekä
b) valotehokkuus, valovirta ja värilämpötila syöttöjännitteen funktiona.

Kuvassa 8.14 on esitetty lampun mitatut säteilyn spektrit kolmella eri syöttöjännitteen arvolla (pystysuora polttoasento). Kuvassa 8.14 a on referenssikuristimen nimellisjännitteellä 220 V mitattu säteilyn spektri. Kuvasta voi havaita spektrissä esiintyvän kuopan natriumin resonanssiivojen 589.0 nm ja 589.6 nm kohdalla (luku 4.5.1). Syöttöjännitemuutokset aiheuttavat muutoksia purkausputkessa olevan natriumin höyrinpaineessa, mistä on seurauksena muutoksia säteilyn spektrissä. Syöttöjännitteen kasvusta on seurauksena natriumin höyrinpaineen kasvaminen, jolloin säteilyn spektri levenee ja värilämpötila kasvaa, kuva 8.14 b. Kuvassa 8.14 c on syöttöjännite laskenut arvoon 170 V. Tällöin natriumin höyrinpaineen laskiessa natrium alkaa lähettää säteilyä resonanssiivoillaan 589.0 nm ja 589.6 nm. Tämä näkyy spektrissä esiintyneen kuopan häviämisenä. Syöttöjännitteen laskiessa natriumin höyrinpaine laskee ja spektri kapenee, jolloin värilämpötila laskee ja säteily alkaa yhä enemmän muistuttaa tavallisen suurpainenatriumlampun säteilyä. Syöttöjännitteen ollessa 170 V on värilämpötila laskenut arvoon 1986 K.



Kuva 8.14 Värikorjatun suurpainenatriumlampun Philips SON-T Comfort 250 W säteilyn spektrit syöttöjännitteen arvoilla a) 220 V, b) 230 V ja c) 170 V.

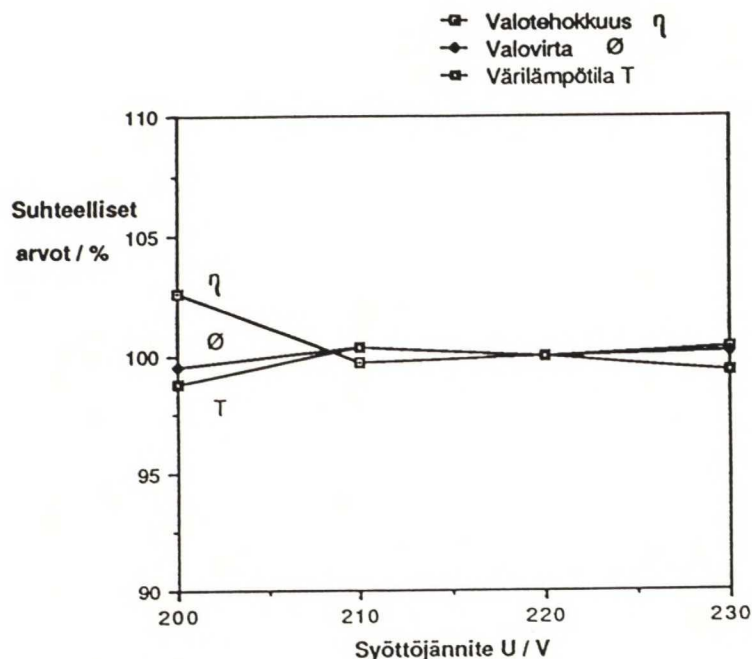
8.2.2.8 Värikorjattu suurpainenatriumlamppu Philips SDW-T White SON 50 W

Taulukossa 8.9 on esitetty värikorjatun suurpainenatriumlampun Philips SDW-T White SON 50 W ($R_a > 80$) mittaustulokset. Lampun polttoasento on vapaa. Mittaukset suoritettiin pystysuorassa polttoasennossa (kanta ylöspäin). Lampun kuristimen ja sytytinlaitteen poikkeavasta johdotuskytkennästä johtuen ei tämän lampun lampputehoa ja -jännitettä mitattu. Liitäntälaitteen nimellisjännitteellä mitattu valovirta (2435 lm) on suurempi kuin valmistajan ilmoittama valovirta (2300 lm). Nimellisjännitteellä mitattu värilämpötila (2458 K) on hyvin lähellä valmistajan ilmoittamaa värilämpötilan arvoa (2500 K).

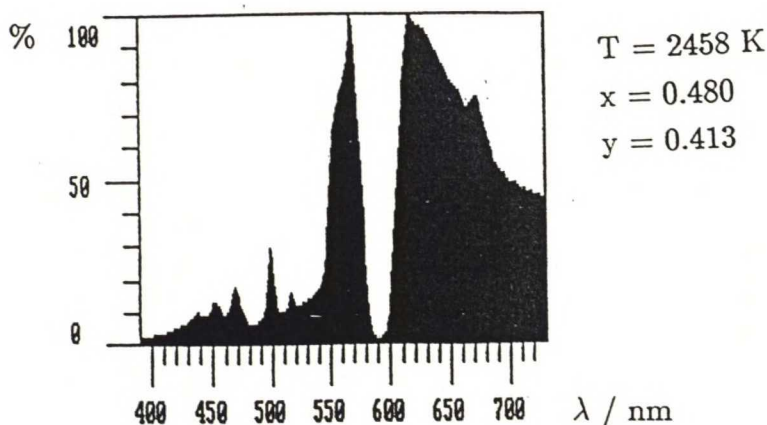
Taulukko 8.9 Värikorjatun suurpainenatriumlampun Philips SDW-T White SON 50 W mittaustulokset mittausten suoritusjärjestyksessä (N:o). Syöttöjännite U , liitäntälaitteen verkosta ottama virta I_v , lampun ja liitäntälaitteen kokonaisteho P_k , valovirta ϕ , värikoordinaatit x ja y sekä värilämpötila T .

N:o	$U /$ V	$I_v /$ A	$P_k /$ W	$\Phi /$ lm	x	y	$T /$ K
1.	220	0.74	64.41	2 435	0.480	0.413	2458
2.	230	0.75	64.34	2 438	0.482	0.414	2440
3.	210	0.74	64.83	2 443	0.479	0.412	2466
4.	200	0.72	62.55	2 424	0.483	0.413	2428

Lampun sytytinlaitteen sisältämä elektroninen tehon stabilointipiiri pyrkii pitämään lampun tehon vakiona syöttöjännitteessä tapahtuvista muutoksista huolimatta. Tämä vaikutus näkyy mittaustuloksissa, joista voi havaita liitäntälaitteen verkosta ottaman virran ja kokonaistehon muutoksien olevan hyvin pieniä, kun syöttöjännite on liitäntälaitteille ilmoitetulla sallitulla jännitealueella 210 - 240/260 V. Myös lampun valovirta ja väriominaisuudet säilyvät muuttumattomina. Kun syöttöjännitteen arvo oli 200 V, alkoi liitäntälaitteen verkosta ottamassa virrassa ja kokonaistehossa näkyä pieniä muutoksia. Lamppu ei sovellu säädinkäyttöön sytytinlaitteen sisältämästä elektronisesta tehon stabilointipiiristä johtuen, mistä syystä ei mittauksissa alitettu 200 V syöttöjännitteen arvoa. Kuvassa 8.15 on esitetty lampun valovirran, valotehokkuuden ja värilämpötilan suhteelliset muutokset syöttöjännitteen funktiona. Kuvassa 8.16 on esitetty liitäntälaitteen nimellisjännitteellä mitattu säteilyn spektri. Muilla syöttöjännitteen arvoilla mitatuissa spektrikuviissa ei esiintynyt havaittavia eroja tähän kuvaan verrattuna.



Kuva 8.15 Värikorjatun suurpainenatriumlampun Philips SDW-T White SON 50 W valotehokkuus, valovirta ja värilämpötila syöttöjännitteen funktiona.



Kuva 8.16 Värikorjatun suurpainenatriumlampun Philips SDW-T White SON 50 W säteilyn spektri syöttöjännitteen ollessa 220 V.

8.2.2.9 Yhteenveto värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen mittauksista

Mittauksissa oli mukana kaksi väriominaisuuksiltaan erilaista värikorjattua suurpainenatriumlamppua. Valmistaja ilmoittaa mitatun 250 W värikorjatun suurpainenatriumlampun (Philips SON-T Comfort 250 W) värintoistoindek-

siksi $R_a=60$ ja värilämpötilaksi 2150 K. Toisen mitatun värikorjatun suurpainenatriumlampun (Philips SDW-T White SON 50 W) värintoistoindeksiksi ilmoitetaan $R_a >80$ ja värilämpötilaksi 2500 K. Mittauksissa liitäntälaitteiden nimellisjännitteellä mitatut värilämpötilat ovat hyvin lähellä valmistajan ilmoittamia arvoja.

Mittauksissa 250 W värikorjatun suurpainenatriumlampun syöttöjännitettä säädettiin välillä 170 - 230 V. Syöttöjännitteen ollessa välillä 210 - 230 V ($\pm 5\%$ liitäntälaitteen nimellisjännitteestä) säilyivät lampun väriominaisuudet suhteellisen muuttumattomina. Syöttöjännitteen laskiessa lampun värilämpötila alkoi laskea. Syöttöjännitteen ollessa 170 V oli lampun valovirta noin 40 % nimellisjännitteellä mitatusta arvostaan ja värilämpötila oli laskenut arvosta 2143 K arvoon 1986 K. Alhaisilla valovirran arvoilla lampun valo alkoi yhä enemmän muistuttaa tavallisen suurpainenatriumlampun keltaista valoa.

Mitatun 50 W värikorjatun suurpainenatriumlampun syöttöjännitettä säädettiin välillä 200 - 230 V. Lamppu ei sovellu säädinkäyttöön sytytinlaitteen sisältämästä elektronisesta tehon stabilointipiiristä johtuen, mistä johtuen ei mittauksissa alitettu 200 V syöttöjännitteen arvoa. Sytytinlaitteen sisältämästä elektronisesta tehon stabilointipiiristä johtuen muutokset lampun sähköisissä suureissa ja valovirrassa olivat hyvin pieniä mitatulla syöttöjännitealueella. Myös lampun värilämpötila säilyi lähes muuttumattomana syöttöjännitteen vaihteluista huolimatta.

8.2.3 Virhelähteet

Valovirtamittauksiin voivat synnyttää virhettä mm. referenssilampun epätarkkuus sekä epätarkkuudet mittalaitteissa. Näiden virheiden vaikutus näkyy valovirran absoluuttisissa arvoissa, mutta virhelähteillä ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta verrattaessa lamppujen valovirran suhteellista muuttumista nimellisjännitteellä mitatusta arvostaan. Sähköisten arvojen mittauksissa virhettä voivat aiheuttaa mittareiden epätarkkuudet. Verrattaessa lamppujen sähköisten arvojen suhteellista muuttumista, eivät mittareiden epätarkkuudesta johtuvat virheet absoluuttisissa arvoissa kuitenkaan suuresti vaikuta vertailun tuloksiin. Mittauksiin voivat virhettä myös synnyttää satunnaiset inhimilliset virheet eli lukemavirheet.

Käytetyt liitälaitteet olivat referenssikuristimia lukuunottamatta 32 W monimetallilampun ja 50 W värikorjatun suurpainenatriumlampun liitälaitteita. Näiden lamppujen liitälaitteina käytettiin valmistajien sarjatuotantoliitälaitteita, mikä on saattanut vaikuttaa tuloksiin lamppujen toimintolosuhteiden mahdollisesti poiketessa nimellisolosuhteista.

8.2.4 Yhteenveto

Monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen syöttöjännitteen säädön on tapahduttava hitaasti, sillä liian nopea säätö voi aiheuttaa lamppujen sammumisen.

Monimetallilampun lamppujännitteen muutokset ovat syöttöjännitettä säädetäessä suhteellisen pieniä lamppuvirran ja lampputehon muutoksista huolimatta. Syöttöjännitteen säätäminen vaikuttaa monimetallilampun sähköisten arvojen ja valovirran muuttumisen ohella lampun väriominaisuuksiin. Monimetallilampun spektrin ja siten väriominaisuuksien muutokset riippuvat purkausputkessa käytetyistä metalliyhdisteistä. Värilämpötilan muutokset olivat mitatuilla monimetallilampuilla suhteellisen suuria jo normaalilla verkkojännitevaihtelualueella. Esimerkiksi monimetallilampun Philips HPI-T 250 W värilämpötilan kokonaismuutos oli 823 K syöttöjännitteen vaihtelualueella 210 - 230 V. Monimetallilampuista poikkeuksen muodosti lamppu GE Halarc 32 W, jonka elektronisen liitälaitteen johdosta lampputeho ja siten väriominaisuudet säilyivät normaalilla verkkojännitevaihtelualueella lähes vakioina. Elektronisesta liitälaitteestaan johtuen tämä lamppu ei sovellu säädinkäyttöön. Muita mitattuja monimetallilamppuja säädettiin noin 50 - 60 % valotasolle asti. Näin alhaisilla valovirran arvoilla olivat lamppujen värilämpötilan muutokset huomattavia.

Värikorjatuille suurpainenatriumlampuille ovat ominaisia monimetallilamppuja voimakkaammat lamppujännitteen muutokset syöttöjännitettä säädetäessä. Tämä havaittiin värikorjatun suurpainenatriumlampun Philips SON-T Comfort 250 W mittauksissa. Myös tämän lampun väriominaisuudet muuttuivat syöttöjännitettä säädetäessä. Kun valovirta oli noin 40 % nimellisjännitettä vastaavasta arvostaan oli värilämpötila laskenut arvosta 2143 K arvoon 1986 K. Tällä valotasolla lampun valo alkoi muistuttaa tavallisen suurpainenatriumlampun valoa.

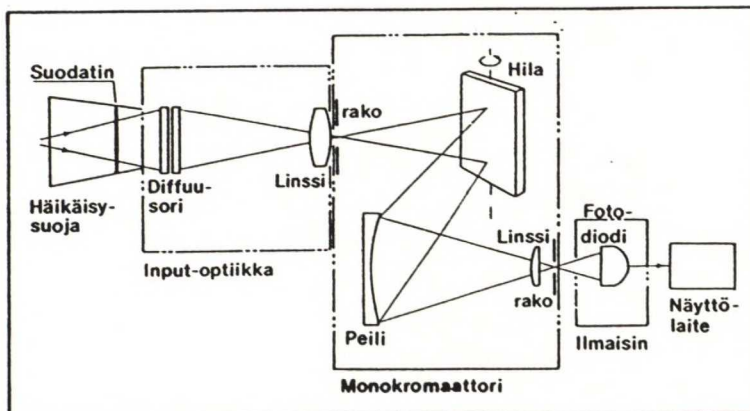
Toisen mitatun värikorjatun suurpainenaatriumlampun Philips SDW-T White SON 50 W ominaisuudet säilyivät lähes vakioina syöttöjännitteen ollessa normaalilla verkkojännitevaihtelualueella. Tämä johtui lampun liitäntälaitteen sisältämästä elektronisesta tehon stabilointipiiristä, joka pyrkii pitämään lampputehon ja siten lampun väriominaisuudet vakaina verkkojännitteen vaihteluista huolimatta. Sytytinlaitteen sisältämästä elektronisesta tehon stabilointipiiristä johtuen ei lamppu sovellu säädinkäyttöön.

Tulosten tarkastelun yhteydessä on muistettava, että kustakin lampputyypistä mitattiin ainoastaan yksi lamppu, jonka toiminta saattaa poiketa muista valmistuserän lampuista.

8.3 UV - säteilymittaukset

8.3.1 Mittausjärjestelyt

Spektrimittaukset tehtiin EG&G 580/585 spektroradiometrilla, joka oli varustettu tyhjödiodi-ilmaisimella. Tulevaa säteilyä rajoitti häikäisy-suoja, jonka suuntakuvio on 14° . Tämän jälkeen säteilyä suodatettiin siten, että mitattavalle aallonpituusalueelle ei tullut muilta alueilta useamman kertaluvun diffraktiokuvioita. Suodatin esti mitattavaa aluetta lyhyempiaaltoisen tai pitempiaaltoisen säteilyn pääsyn monokromaattoriin. Sisääntulo-optiikassa säteily diffusoitui. Kokoava linssi muodosti diffuuserista kuvan hilalle, jota käännettiin aallopi-tuustiedon saamiseksi. Mittauslaitteiston periaate on esitetty kuvassa 8.17.



Kuva 8.17 Spektroradiometrin kaavio [59].

Mittauslaitteeseen oli kytketty automaattinen digitaalinen tallennusjärjestelmä, joka tallensi ilmaisimelta tulevan virtasignaalin ja hilan kääntömekanismista tulevan aallonpituustiedon nauhurille. Nauha analysoitiin laboratoriossa Tetronix 4052 tietokoneella. Mittauksissa käytettiin spektrisenä kaistanleveytenä 5 nm. Mittausjärjestelmän dynaaminen alue oli noin 60 dB ja havaitsemisherkkyys parempi kuin 10^{-8} W/cm²/nm. Mittauslaite oli kalibroitu standardilampulla Optronix M-356, joka oli myös tarkistettu (NBS, USA). Mittauslaitteen valmistaja ilmoittaa kalibroidun laitteen absoluuttiseksi tarkkuudeksi $\pm 15\%$ UV-säteilyn alueella [64].

Spektroradiometrilla mitattiin Osramin 150 W kaksikantaisen, kvartsilasisella ulkokuvulla varustetun monimetallilampun spektri aallonpituusalueella 200 - 400 nm. Mitattavan lampun tyyppi on Osram HQI-TS 150/NDL (4300 K). Mitaukset suoritettiin lampun ollessa valaisimessa ilman valaisimen suojalasiasia sekä valaisimen suojalasin kanssa. Spektri mitattiin määrittämällä säteilyn spektriset tehotiheydet kullekin aallonpituusalueen 5 nm kaistalle. Mittaustuloksista laskettiin UV-C- (200 - 280 nm), UV-B- (280 - 315 nm) ja UV-A-alueen (315 - 400 nm) tehotiheydet sekä koko alueen tehotiheys. Lisäksi tuloksista laskettiin aallonpituusalueella 200 - 315 nm painotettu tehotiheys E_{eff} , joka saadaan yhtälöstä 8.1

$$E_{eff} = \sum_{200}^{315} E_{\lambda} S_{\lambda} \Delta\lambda \quad (8.1)$$

jossa

E_{eff} = monokromaattisen 270 nm säteilijän suhteen painotettu tehotiheys (W/cm²)

E_{λ} = spektrinen tehotiheys (W / cm²nm)

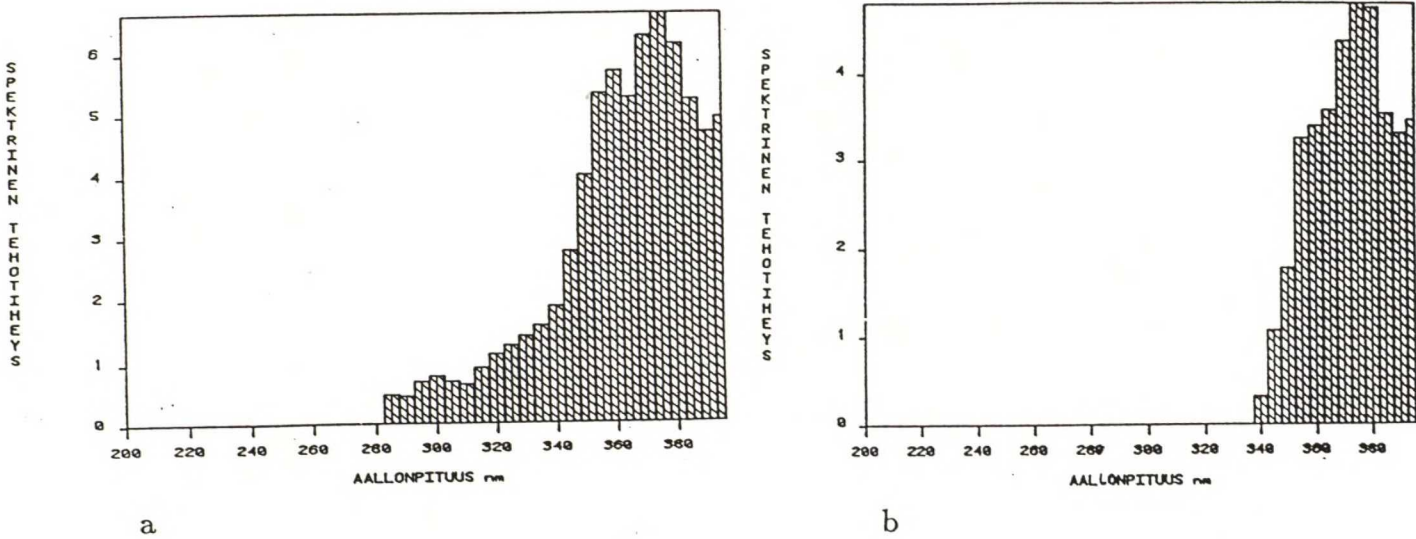
S_{λ} = suhteellinen spektriherkkyyskerroin

$\Delta\lambda$ = kaistanleveys (nm).

Painotetun tehotiheyden käyttö perustuu amerikkalaisen työhygieenikkojärjestön ACGIH:n UV-säteilyn työterveydellisiin suosituksiin (luku 6.4), jotka perustuvat säteilyn aiheuttamiin silmä- ja ihovaikutuksiin [59]. Mittaustuloksista laskettiin näihin suosituksiin perustuen sallittu päivittäinen enimmäisaltistumisaika, joka saadaan jakamalla suurin sallittu energiatiheys 30 J/m² lasketulla painotetulla tehotiheydellä. Mittaustulokset ja siten myös lasketut enimmäisaltistumisajat vastaavat suoraa altistumista 1 metrin etäisyydellä valonlähteestä.

8.3.2 Mittaustulokset

Spektroradiometrilla tehtyjen spektrimittausten tuloksena saadut spektrijakaumat 150 W kaksikantaiselle monimetallilampulle on esitetty kuvassa 8.18. Kuvan 8.18 a spektri on mitattu lampun ollessa valaisimessa ilman valaisimen suojalasia ja kuvan 8.18 b spektri lampun ollessa valaisimessa suojalasin kanssa.



Kuva 8.18 Monimetallilampun HQI-TS 150/NDL spektrijakaumat. Lamppu valaisimessa ilman valaisimen suojalasia (a) ja suojalasin kanssa (b).

Taulukossa 8.10 on esitetty mittauksissa saadut tehotiheydet eri aallonpituusalueilla, koko mitatun aallonpituusalueen yhteen laskettu tehotiheys sekä yhtälön 8.1 mukaan laskettu painotettu efektiivinen tehotiheys.

Taulukko 8.10 Monimetallilampun HQI-TS 150/NDL mitatut säteilyn tehotiheydet eri allonpituusalueilla sekä laskettu painotettu tehotiheys E_{eff} .

Aallonpituusalue	Tehotiheys $\mu W/cm^2$	
	Ilman suojalasia	Suojalasin kanssa
200 - 280 nm	0.00	0.00
280 - 315 nm	23.637	0.00
315 - 400 nm	346.222	207.214
200 - 400 nm	369.859	207.214
200 - 315 nm, E_{eff}	6.527	0.00

Lyhytaaltoiselle (200 - 315 nm) valaisimesta lähtevälle UV-säteilylle saadaan ACGIH:n suosituksiin perustuvaksi sallituksi päivittäiseksi altistumisajaksi 7.68 minuuttia, kun valaisin on ilman suojalasia. Koska sallittu päivittäinen altistumisaika on näin lyhyt, tulee altistumista lampun säteilylle välttää kokonaan lampun ollessa valaisimessa ilman valaisimen suojalasia. Kun valaisimen suojalasi on paikallaan, ei altistumisaikaa ole rajoitettu, koska tällöin lyhytaaltoista UV-säteilyä (200 - 315 nm) ei esiinny.

Aallonpituusalueella 315 - 400 nm (UV-A) säteilyn tehotiheys ei ACGIH:n suositusten mukaan saa olla yli $1000 \mu W/cm^2$ kun altistumisaika on pitempi kuin 1000 s. Kun altistumisaika on lyhyempi kuin 1000 sekuntia, ei UV-A-säteilyn energiatiheys saa olla yli $1 J/cm^2$. Mittauksissa saadut UV-A-alueen säteilyn tehotiheydet alittavat suositusten mukaiset enimmäistehotiheydet sekä valaisimen suojalasin kanssa että ilman suojalasia.

Koska mitatun lampun kvartsilasinen ulkokupu läpäisee myös lyhytaaltoisen säteilyn (kvartsilasin säteilyn läpäisyalue 185 - 4000 nm), lähtee lampusta huomattavasti säteilyä myös UV-alueella. Lampun säteily UV-A-alueella alittaa ACGIH:n suositusten mukaiset enimmäisarvot, kun mittaustulokset vastaavat suoraa altistumista 1 metrin etäisyydellä valonlähteestä. Sen sijaan 1 metrin altistumisetäisyyttä vastaava lyhytaaltoisen UV-säteilyn (200 - 315 nm) määrä on huomattava, mistä johtuen on valaisimessa aina käytettävä UV-säteilyn absorboivaa suojalasia.

UV-säteilymittauksissa ei ollut mukana värikorjattuja suurpainenaatriumlamppuja, koska näiden lamppujen UV-säteilyn määrä on käytännössä merkityksetön. Lamppujen kokonaistehosta UV-säteilytehoksi muuttuva osuus on vain noin 0.5 - 1 %.

9. Lamppujen käyttö

9.1 Yleistä

Monimetallilamput ja värikorjatut suurpainenatriumlamput soveltuvat useisiin erityyppisiin käyttökohteisiin sekä sisä- että ulkokäyttöön. Värikorjatut suurpainenatriumlamput voidaan edellä esitetyn (luku 4.5.3) perusteella jakaa kahteen eri ryhmään valon väriominaisuuksien perusteella. Sen sijaan erityyppisten monimetallilamppujen ominaisuudet poikkeavat hyvinkin paljon toisistaan.

Erityyppiset käyttökohteet asettavat valaistukselle ja valonlähteille erilaisia vaatimuksia. Kun jossain käyttökohteessa valon värintoistolla on valonlähdettä valittaessa olennainen merkitys, painotetaan taas toisessa kohteessa ennenkaikkea taloudellisuutta, jolloin lamppujen valotehokkuus ja polttoikä ovat ratkaisevia. Erityisesti monimetallilamppujen yhteydessä on muistettava, etteivät kaikki lampputyypit välttämättä sovellu samantyyppisiin käyttökohteisiin.

Lamppujen soveltuvuutta kuhunkin käyttötarkoitukseen vertailtaessa on muistettava myös kunkin lampputyypin haittapuolet. Näitä ovat monimetallilampuilla ja suurpainenatriumlampuilla herkkyys jännitevaihteluille (muutamia lampputyyppejä lukuunottamatta) sekä sammuminen jännitekatkoksissa ja äkillisissä jännitetason putoamisissa. Monimetallilamput ja suurpainenatriumlamput vaativat muiden purkauslamppujen lailla tietyn syttymisajan, jonka aikana lamppu saavuttaa nimellisvalovirtansa. Sammuttuaan lamput vaativat jäähtymisajan ennen kuin jälleensyttyminen on mahdollista. Poikkeuksena ovat kaksikantaiset monimetallilamput, jotka voidaan varustaa välittömän jälleensyttymisen mahdollistavalla pikasytytyslaitteella. Näiden pikasytytyslaitteiden hinnat ovat kuitenkin moninkertaisia tavallisiin sytytyslaitteisiin verrattuna. Lisäksi osa pikasytytyslaitteista on suurikokoisia tavalliseen sytytyslaitteeseen verrattuna. Tämän johdosta kaikki pikasytytyslaitetyypit eivät kokonsa puolesta sovellu kaikkiin kaksikantaisten monimetallilamppujen valaisinmalleihin.

Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen osalta mainittakoon, ettei värintoistoindeksi $R_a = 60 \dots 65$ omaaville lampuille (tehoalue 150 - 400 W) ole markkinoilla omia valaisinmalleja. Näitä värikorjattuja suurpainenatriumlamppuja voidaan käyttää useimmissa samoissa valaisimissa kuin samantehoisia tavallisia suurpainenatriumlamppuja, vaikkei värikorjattuja lamppuja ole valaisinvalmistajien luetteloissa erikseen mainittukaan. Lamppujen kannat ovat tyyppiä E40, mikä on sama kuin muilla samantehoisilla purkauslamppuilla.

Seuraavassa käydään läpi eri käyttökohteiden valaistukselle asettamia vaatimuksia sekä selvitetään monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen soveltuvuutta ao. käyttökohteisiin. Kun eri käyttökohteiden yhteydessä puhutaan lamppujen polttoiästä, on syytä muistaa näiden polttoikien olevan valmistajien ilmoittamia suuntaa-antavia tuntimääriä, joihin mm. lampun sytytystaajuudella on suuri vaikutus. Seuraavassa tarkastelussa esitettävissä valotehokkuuksien arvoissa on huomioitu lamppujen liitäntälaittehäviöt.

9.2 Myymälät

9.2.1 Valaistukselle asetettavia vaatimuksia

Myymälävalaistuksessa on valon värintoistokyvyllä ja värisävyllä suuri merkitys. Valonlähteiden värintoistokyvyn tulee olla riittävä, tavallisimmin edellytetään lamppujen yleisen värintoistoindeksin olevan vähintään $R_a = 70$. Myymälöissä käytetään usein värisävyltään lämpimän valkoisia (värilämpötila $< 3300\text{ K}$) tai neutraalin valkoisia (värilämpötila $3300 \dots 5000\text{ K}$) valonlähteitä. Harvemmin käytetään lamppeja, joiden värilämpötila on yli 5000 K [70].

Varsinkin myymälöiden yleisvalaistuksessa on painotettava valonlähteiden valotehokkuutta, jolloin valopisteiden ja valaisimien lukumäärä saadaan mahdollisimman pieneksi. Valaistuksen käyttökustannusten vuoksi tärkeitä seikkoja ovat lamppujen valotehokkuuden ohella lamppujen polttoikä. Luonnollisesti myös valaisimien ja lamppujen hankintakustannukset on huomioitava vaihtoehtoisia valaistusratkaisuja vertailtaessa. Varsinkin myymälöiden kohdevalaistuksessa valaisimien koolla saattaa myös olla merkitystä. Valaistusratkaisua suunniteltaessa on otettava huomioon myös valaistuksen muunneltavuus, jolloin ainakin osan valaisimista tulee olla erilaisiin kiskojärjestelmiin soveltuvia. Myymälävalaistuksessa on lisäksi kiinnitettävä huomiota valonlähteiden lämpövaikutukseen sekä erityisesti UV-säteilyn tuotteita haalistavaan vaikutukseen.

9.2.2 Monimetallilamput

Monimetallilamppujen käyttöä sisätiloissa on aiemmin rajoittanut saatavilla olevien lamppujen suhteellisen suuret lampputehot (250 ja 400 W) sekä lamppujen liian kylmiksi koetut värisävyt. Tällä hetkellä on markkinoilla kuitenkin myös pienitehoisia, lämminsävyisiä monimetallilamppuja [70].

Kaksikantaiset pienitehoiset (70 ja 150 W) monimetallilamput soveltuvat myymälävalaistuksen valonlähteiksi sekä yleis- että kohdevalaistukseen. Näillä lamppuilla saadaan kohdevalaisimissa aikaan hyvinkin kapeita valokeiloja lamppujen purkausputken pienestä koosta johtuen. Kaksikantaiset monimetallilamput soveltuvat myös epäsuoraan valaistukseen, jossa valo heijastetaan katto- ja seinäpintojen kautta huonetilaan. Kaksikantaisten monimetallilamppujen etuja ovat hyvä värintoisto ($R_a = 80 \dots 85$) ja korkea valotehokkuus (56 ... 66 lm/W). Lamppujen värilämpötilat ovat 3000 ja 4300 K. Lampun polttoiäksi ilmoitetaan 6 000 tuntia. Erityisesti kaksikantaisille pienitehoisille (70, 150 W) monimetallilampuille on ominaista värilämpötilan muuttuminen polttoian myötä, mikä saattaa olla häiritsevää tiloissa, joissa on eri-ikäisiä lamppuja. Polttoian aikana tapahtuvat värilämpötilan muutokset riippuvat lampputyypistä ja -tehosta, tyypillisesti muutokset ovat 70 ja 150 W kaksikantaisille lamppuille ± 300 K [34]. Myös verkkojännitevaihtelut saattavat aiheuttaa muutoksia monimetallilamppujen väriominaisuuksissa.

Kaksikantaisten monimetallilamppujen polttoasennon on oltava vaakasuora, josta sallittu poikkeama saa olla $\pm 45^\circ$. Kohdevalaisimiin lamput sijoitetaan kohtisuoraan valaisimen pituussuuntaan nähden, jolloin valaisinta voidaan kääntää vapaasti pystysuunnassa ja valo saadaan suunnattua haluttuun kohteeseen. Näiden monimetallilamppujen käytön yhteydessä on aina muistettava, että lampun kvartsilasinen ulkokupu läpäisee purkauksessa syntyneen UV-säteilyn. Valaisimessa tulee tämän vuoksi olla aina UV-säteilyä absorboiva suojalasi. Markkinoilla oleville valaisimille on olemassa kahdentyyppisiä suojalaseja. Iholle ja silmille vaarallisen lyhytaaltoisen UV-säteilyn suodattava suojalasi päästää läpi pitkäaaltoisen UV-säteilyn, jolla taas on muita aallonpituuksia todennäköisemmin tuotteita haalistava vaikutus. Myymälätiloissa on perusteltua käyttää valaisimissa suojalasia, joka absorboi kaiken purkauksessa syntyneen UV-säteilyn.

Hiljattain markkinoille tulleet erikoiskannalla varustetut yksikantaiset 35, 70 ja 150 W monimetallilamput soveltuvat myös myymälöiden kohde- ja yleisvalaistukseen lämpimän värisävynsä (värilämpötila 3000 K) ja hyvän värintoistonsa

($R_a = 80$) ansiosta. Lamppujen etuja ovat lisäksi korkea valotehokkuus (50 ... 70 lm/W) sekä pitkä polttoikä (6 000 tuntia) [34]. Lamput ovat pienikokoisia (pituus noin 8 cm) ja niiden polttoasento on vapaa. Myös näiden lamppujen kvartsilasinen ulkokupu läpäisee purkauksessa syntyneen UV-säteilyn, joten valaisimessa on syytä käyttää UV-säteilyn absorboivaa suojalasia.

Monimetallilampuissa saattaa esiintyä värieroja yksittäisten lamppujen kesken. Syitä värieroihin voivat olla verkkojännitevaihtelut, kuristimien ja valaisimien keskinäiset erot tai lampun väärä polttoasento. Lisäksi uusien lamppujen kesken voi esiintyä värilämpötilaeroja (noin ± 150 K). Nämä värierot saattavat myymälätiloissa olla kiusallisia.

Monimetallilampuista oma lampputyypinsä on DC-käyttöinen 32 W lamppu (luku 3.1.7.3). Myös tämä lamppu soveltuu myymälöiden yleisvalaistuksen valonlähteeksi. Lampun valo on lämminsävyistä (värilämpötila 3000 K). Värintoisto-ominaisuudet ovat edellä käsiteltyjä monimetallilamppuja hiukan huonommat värintoistoindeksin ollessa $R_a = 70$. Lampun valotehokkuus on korkea, 65 lm/W. Polttoasento on pystysuora (kanta ylöspäin), josta sallittu poikkeama on $\pm 15^\circ$ [38]. Rajoitetusta polttoasennosta sekä ellipsoidinmuotoisesta, valoa hajoittavalla jauheella päällystetystä ulkokuvusta johtuen ei lamppu sovellu kohdevalaistukseen. Tämän lampun syttymisaika on 2 - 4 minuuttia ja jälleensyttymisaika noin 3 - 6 minuuttia. Lampun polttoikä on samaa luokkaa kuin em. muiden monimetallilamppujen. Koska lampun ulkokupu suodattaa pois purkauksessa syntyneen UV-säteilyn, voidaan lamppua polttaa myös avoimessa valaisimessa. DC-käytön ansiosta lampun valossa ei esiinny välkyntää. Elektronisen liitäntälaitteen toiminnasta johtuen normaalit verkkojännitevaihtelut eivät aiheuta muutoksia lampun väriominaisuuksissa ja valontuotossa.

Monimetallilamppujen käyttöä myymälöiden kohdevalaistuksessa hidastavat lamppujen korkeat hankintahinnat. Kohdevalaistuksessa paljon käytettyihin halogeenilamppuihin verrattuna monimetallilamppujen kiistattomia etuja ovat pidempi polttoikä sekä korkeampi valotehokkuus. Korkeammasta valotehokkuudesta johtuen saman valovirran tuottamiseen tarvitaan monimetallilampuilla pienemmät lampputehot, jolloin valaisimien lämmöntuotto jää vähäisemmäksi. Halogeenilamppuun verrattuna monimetallilampun haittapuolia ovat muutamien minuuttien pituinen syttymisaika sekä jälleensyttymisaika, joka tosin voidaan eliminoida pikasytytyslaitteen avulla. Halogeenilamppujen hankintahinnat ovat huomattavasti alhaisemmat kuin monimetallilamppujen.

Joissain tapauksissa on myymälätiloissa tarvetta valaistuksen säätöön. Monimetallilamppujen haittapuolia on niiden valon värin voimakas muuttuminen säädinkäytössä. DC-käyttöinen 32 W monimetallilamppu ei myöskään elektronisesta liitäntälaitteestaan johtuen sovellu säädinkäyttöön.

9.2.3 Värikorjatut suurpainenatriumlamput

Värikorjatut suurpainenatriumlamput, joiden värintoistoindeksi $R_a = 60 \dots 65$ ja värilämpötila on 2150 - 2200 K (luku 3.2.7.1) eivät väriominaisuuksiensa puolesta sovellu myymälävalaistuksen valonlähteiksi. Lamppujen värintoist ominaisuudet eivät useimmissa tapauksissa ole riittävät myymälävalaistukseen, jossa myös lamppujen värilämpötilaa pidetään liian alhaisena.

Sen sijaan värikorjatut suurpainenatriumlamput, joiden värintoistoindeksi $R_a > 80$ soveltuvat myymälävalaistuksen valonlähteiksi. Lamppujen värilämpötila on 2500 K, joten niiden valo on lämminsävyistä. Tehovalikoima on tällä hetkellä 35, 50 ja 100 W ja valotehokkuus 30 - 40 lm/W [35]. Lamppuja voidaan käyttää sekä yleis- että kohdevalaistukseen. Markkinoilla olevilla valaisimilla saadaan aikaan myös pistemäinen kohdevalaistus. Kohdevalaistusta varten lampuille on valaisimia, jotka voidaan kiinnittää virtakiskoon. Lamppujen polttoasento on vapaa, jolloin valaisinta voidaan virtakiskossa kääntää vapaasti ja valo saadaan suunnattua haluttuun kohteeseen. Näiden lamppujen valo ei sisällä UV-säteilyä. Lamppujen polttoiksi ilmoitetaan 5 000 tuntia.

Valmistaja ilmoittaa 35 - 100 W värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen syttymisajaksi 3 minuuttia ja jälleensyttymisajaksi jopa alle 0.5 minuuttia. Vaikka jälleensyttymisaika onkin lyhyt, on se kuitenkin luettava haitaksi verrattaessa lamppua hehku- ja halogeenilamppuihin. Lamppujen haittapuoliin kuuluu lisäksi niiden soveltumattomuus säädinkäyttöön, mihin on syynä lamppujen sytytinlaitteen sisältämä elektroninen tehon stabilointipiiri (ks. luku 5.5.2).

Nämä 35 - 100 W värikorjatut suurpainenatriumlamput ovat purkauslampuiksi suhteellisen pienikokoisia (lampun pituus 15 cm). Liitäntälaitteiksi tarvittavat kuristin ja sytytin lisäävät valaisimen kokoa. Lamppujen kohdevalaisimet ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa kaksikantaisten monimetallilamppujen ja tiettyjen halogeenilamppujen kohdevalaisimien kanssa.

Nämä 35 - 100 W värikorjatut suurpainenatriumlamput saattavat olla vaihtoehtoinen kohde- ja yleisvalaistuksen valaistusratkaisu esimerkiksi edellä esitettyihin 35 - 150 W yksikantaisiin monimetallilamppuihin verrattuna. Lamppujen väriominaisuudet ovat lähellä toisiaan. Värikorjatun suurpainenatriumlampun värilämpötila on hiukan alhaisempi kuin em. monimetallilamppujen, joten sen valon väri on hieman lämminsävyisempää. Värikorjatun suurpainenatriumlampun valo ei sisällä UV-säteilyä, joka tosin monimetallilampunkin yhteydessä suodatetaan pois valaisimen suojalasin avulla. Molempien lamppujen polttoasento on vapaa. Lamppujen hankintahinnat ja polttoiät ovat samaa suuruusluokkaa. Monimetallilamppujen eduksi on luettava korkeampi valotehokkuus ja pienempi lampun koko. Lamppujen syttymis- ja jälleensyttymisajat ovat samaa luokkaa. Verkkojännitevaihtelut saattavat aiheuttaa muutoksia monimetallilampun valon värissä. Em. värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valon väri sen sijaan ei havaittavasti muutu normaalien verkkojännitevaihteluiden aikana. Tämä johtuu lampun sytytinlaitteen sisältämästä elektronisesta tehon stabilointipiiristä, joka pyrkii pitämään lampputehon ja siten myös valontuoton vakiona lampun syöttöjännitteen vaihteluista (normaali verkkojännitevaihteluarvo) huolimatta. Tästä tehon stabilointipiiristä johtuen nämä värikorjatut suurpainenatriumlamput eivät sovellu säädinkäyttöön. Myöskään monimetallilamput eivät sovellu hyvin säädinkäyttöön valon värimuutoksista johtuen.

9.3 Julkiset tilat

9.3.1 Valaistukselle asetettavia vaatimuksia

Erilaisten julkisten sisätilojen (kirjastot, museot, näyttelytilat, aulat, ravintolat) valon väriominaisuudet määräytyvät tilan luonteen ja käyttötarkoituksen mukaan.

Erityyppisissä julkisissa tiloissa saattaa olla tarpeen pystyä säätämään valaistustasoa. Museoissa ja näyttelytiloissa on valaistus järjestettävä siten, etteivät esineet vaurioidu valonlähteiden lämpö- ja UV-säteilyn vaikutuksesta.

Näissä tiloissa on valaistus totuttu pitkälti toteuttamaan hehku-, pienloiste- ja loistelampuin. Lämminsävyiset monimetallilamput ja värikorjatut suurpainenatriumlamput tarjoavat kuitenkin vaihtoehtoisen valaistusratkaisun.

9.3.2 Monimetallilamput

Kaksikantaiset pienitehoiset (70 ja 150 W) sekä erikoiskannalla varustetut yksikantaiset (35 - 150 W) monimetallilamput soveltuvat erilaisten julkisten sisätilojen yleis- ja kohdevalaistukseen. Lamppujen valon väri on lämminsävyistä värilämpötilan ollessa 3000 K ja kaksikantaisilla lampuilla vaihtoehtoisesti myös 4300 K. Lamppujen etuja ovat hyvät värintoisto-ominaisuudet, korkea valotehokkuus sekä pitkä polttoikä (6000 h). Lamppujen säteilyn sisältämä UV-säteily tulee suodattaa pois valaisimen suojalasin avulla.

Julkisten tilojen yleisvalaistukseen soveltuu myös DC-käyttöinen 32 W monimetallilamppu. Myös tämän lampun värilämpötila on 3000 K. Värintoisto-ominaisuudet ovat hiukan huonommat kuin em. monimetallilamppujen, mutta useissa julkisissa tiloissa voidaan lampun värintoistoindeksiä $R_a = 70$ pitää riittävänä. Lampun etuja ovat em. lamppujen tapaan korkea valotehokkuus ja pitkä polttoikä. Lisäksi DC-käytön ansiosta lampun valossa ei esiinny välkynnä. Lampun ulkokupu suodattaa pois purkauksessa syntyneen UV-säteilyn.

Julkisten tilojen valaistuksessa paljon käytettyihin hehku-, pienloiste- ja loistelamppuihin verrattuna monimetallilamppujen haittapuoliin kuuluu muutamien minuuttien pituinen syttymisaika sekä jälleensyttymisaika. Lisäksi monimetallilamppujen haittapuolia ovat niiden huono soveltuvuus säädinkäyttöön. Monimetallilamppujen hankintahinnat ovat suhteellisen korkeita.

9.3.3 Värikorjatut suurpainenatriumlamput

Värintoistoindeksin $R_a = 60 \dots 65$ omaavat värikorjatut suurpainenatriumlamput eivät suurehkojen tehoyksiköidensä (150, 250 ja 400 W) takia sovellu matalien tilojen valonlähteeksi. Ne soveltuvat kuitenkin valonlähteiksi korkeahkoihin julkisiin tiloihin, joissa näiden lamppujen värintoisto-ominaisuuksia voidaan pitää riittävinä. Lamppujen valo on kellertävää värilämpötilan ollessa 2150 - 2200 K. Lamppujen etuja ovat korkea valotehokkuus, pitkä polttoikä sekä vapaa polttoasento. Lamppujen valo ei sisällä UV-säteilyä. Lamput soveltuvat monimetallilamppuja paremmin säädinkäyttöön, sillä näiden värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valon värimuutokset ovat jännitettä säädettäessä pienemmät kuin monimetallilampuilla. Monimetallilamppujen tavoin värikorjatuille

suurpainenatriumlampuille ovat ominaisia tietyt syttymis- ja jälleensyttymisaajat. Lamppujen hankintahinnat ovat monimetallilamppujen tavoin suhteellisen korkeat.

Värintoistoindeksin $R_a > 80$ omaavat värikorjatut suurpainenatriumlamput soveltuvat erilaisten sisätilojen valonlähteiksi. Niiden lämminsävyinen valo (värilämpötila 2500 K) on lähellä hehku- ja halogeenilamppujen valoa. Lamppu on suhteellisen pienikokoinen ja sen polttoasento on vapaa. Lamppujen polttoikäksi ilmoitetaan 5000 tuntia. Lampun valo ei sisällä UV-säteilyä. Lamput soveltuvat mm. hotellien, ravintoloiden ja aulatilojen yleisvalaistukseen kuten myös erilaiseen kohdevalaistukseen. Näiden värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen ($R_a > 80$) haittapuoliksi julkisten tilojen valonlähdevalintoja tehtäessä voitaneen lukea korkeahkot hankintahinnat sekä soveltumattomuus säädinkäyttöön. Lisäksi näille lampuille on monimetallilamppujen tavoin ominaista tietyt syttymis- ja jälleensyttymisaajat. Monimetallilamppuihin verrattuna em. suurpainenatriumlamppujen etuna on valon värin muuttumattomuus verkkojännitevaihteluiden aikana (luku 9.2.3).

9.4 Toimistotilat ja koulut

9.4.1 Valaistukselle asetettavia vaatimuksia

Toimistotilojen yleisvalaistukseen suositellaan yleensä valoa, jonka värilämpötila on lämpimän (< 3300 K) ja neutraalin ($3300 \dots 5000$ K) välillä ja jonka värintoisto on hyvä. Valolle asetettavat värivaatimukset saattavat kuitenkin vaihdella mm. tilan väriytyksestä riippuen. Opetustiloissa valaistusvaatimukset ovat samantapaisia kuin toimistotiloissa. Opetustilojen valonlähteiden värintoistoindeksin suositellaan olevan vähintään $R_a = 65$ [71].

Toimistotiloissa ja kouluissa on valaistus toteutettava taloudellisesti, jolloin tärkeiksi valonlähteiden valintaperusteiksi muodostuvat lamppujen valotehokkuus ja polttoikä, kuten myös lamppujen ja valaisinten hankintahinnat. Lamppujen käyttäytymiseen jännitekatkoksissa on myös kiinnitettävä huomiota. Lamppujen tulisi jännitekatkosten jälkeen syttyä mahdollisimman nopeasti.

Näissä tiloissa on kiinnitettävä erityistä huomiota myös siihen, ettei valo sisällä UV-säteilyä. Valonlähteiden säteilyn pieneenkin UV-osuuteen on suhtauduttava kriittisesti, koska ihmisten altistuminen säteilylle on päivittäistä ja jatkuvaa.

9.4.2 Monimetallilamput

Toimistojen yleisvalaistuksessa on pitkälti totuttu käyttämään loistelamppuja. Monimetallilamput tarjoavat kuitenkin nykyään vaihtoehdon toimistotilojen yleisvalaistuksen valonlähteitä valittaessa. Aikaisemmin eivät markkinoilla olleet monimetallilamput vastanneet pienten toimistotilojen valaistuksen tarpeita. Lamput olivat suuritehoisia ja värisävyltään kylmiä tai neutraaleja. Tällä hetkellä on kuitenkin markkinoilla 70 , 150 ja 250 W monimetallilamppuja, jotka soveltuvat mm. toimistotilojen epäsuoran valaistuksen valonlähteiksi. Epäsuorassa valaistuksessa valo heijastetaan katto- ja seinäpintojen kautta valaistavaan tilaan. Valaistuksen toimivuus edellyttää valaisimien oikeaa sijoittelua sekä oikeita pintamateriaalien valintaa. Monimetallilampuille valmistetaan epäsuoria valaisimia, jotka voidaan kiinnittää seinäpinnalle sekä lattiavalaisimia, joissa valonlähde on sijoitettu jalustan päähän.

Epäsuoraan valaistukseen soveltuvien kaksikantaisten monimetallilamppujen (luku 3.1.7.2) värilämpötilat ovat 70 ja 150 W teholuokissa on 3000 K ja 4300 K sekä 250 W teholuokassa 4300 K. Lamppujen värintoistoindeksi $R_a = 75 \dots 85$. Valotehokkuus on 56 - 66 lm/W.

Monimetallilampan haittapuoliin kuuluu muutamien minuuttien pituinen syttymisaika, jonka aikana lamppu saavuttaa nimellisvalovirtansa. Eräs valaisinvalmistaja on ratkaissut tämän ongelman epäsuoraan valaisimeen saatavalla lisävarusteella, joka on lampunpidin 250 W halogeenilamppua varten. Halogeenilamppu toimii monimetallilampan syttymisjakson ajan, jolloin valaisimesta saadaan valoa välittömästi sytyttämisen jälkeen.

Toinen monimetallilamppujen haitallinen ominaisuus on niiden jälleensyttymisaika. Kaksikantaiset monimetallilamput voidaan kuitenkin varustaa usean kymmenen kilovoltin antavalla sytytyslaitteella, joka takaa myös kuumen lampun välittömän jälleensyttymisen. Tämän pikasytytyslaitteen hinta on kuitenkin moninkertainen tavalliseen sytytyslaitteeseen verrattuna.

Koska kaksikantaisten monimetallilamppujen valo sisältää UV-säteilyä, on valaisimissa aina käytettävä UV-säteilyn absorboivaa suojalasia. Mikäli valaisimen suojalasi jostain syystä rikkoontuu, ei lamppuja tule polttaa ennen uuden suojalasin asentamista. Valaisimien puhdistuksen jälkeen on myös aina varmistettava, että suojalasi tulee paikoilleen.

Epäsuora valaistus toimistotilojen valaistusratkaisuna on vielä suhteellisen uutta. Pitkäaikaisia käyttökokemuksia aiheesta on toistaiseksi melko vähän. Osittain tästä johtuen ovat mielipiteet epäsuoran valaistuksen hyvydestä melko ristiriitaisia. Monimetallilamppuin toteutetulla epäsuoralla valaistuksella on varmasti kuitenkin sijansa toimistotilojen valaistusta toteutettaessa nyt ja tulevaisuudessa.

Myös yksikantaisia erikoiskannalla varustettuja monimetallilamppuja (35 - 150 W) sekä DC-käyttöistä 32 W monimetallilamppua voidaan ajatella toimistotilojen ja koulujen valonlähteiksi, kun valaistus toteutetaan suoralla valaistusperiaatteella. Lamppujen valo on lämminsävyistä (värilämpötila 3000 K). Värintoisto-ominaisuuksia voidaan näissä tiloissa pitää riittävinä, 35 - 150 W lamppujen värintoistoindeksi $R_a = 80$ ja 32 W lampulla $R_a = 70$. Lamppujen valotehokkuudet ovat samaa luokkaa kuin toimistotiloissa ja kouluissa paljon käytettyjen loistelamppujen. Monimetallilamppujen polttoiät ovat kuitenkin loistelamppujen polttoikiä hiukan alhaisemmat. Monimetallilamppujen yksikköhinnat ovat korkeammat kuin loistelamppujen. Monimetallilamppujen haittapuolia ovat syttymis- ja jälleensyttymisajat. DC-käyttöisen 32 W monimetallilampun etuihin kuuluu valon välkkymättömyys.

9.4.3 Värikorjatut suurpainenatriumlamput

Värintoistoindeksin $R_a = 60 - 65$ ja värilämpötilan 2150 - 2200 K omaavat värikorjatut suurpainenatriumlamput eivät väriominaisuuksiensa puolesta sovellu toimistotilojen ja koulujen valonlähteiksi.

Myös värintoistoindeksin $R_a > 80$ omaavien värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valon väriä (värilämpötila 2500 K) voidaan useimmissa tapauksissa pitää liian lämpimänä toimistotiloihin ja kouluihin. Näiden 35 - 100 W värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valotehokkuudet ovat lisäksi alhaisemmat kuin tavallisten loistelamppujen. Myös lamppujen polttoiät ovat alhaisempia loistelamppujen polttoikiin verrattuna. Näiden lamppujen haittapuoliin loistelamppuihin verrattuna kuuluvat suhteellisen pitkät syttymis- ja jälleensyttymisajat. Lamppujen yksikköhinnat ovat korkeammat kuin loistelamppujen.

9.5 Sisäurheilutilat

9.5.1 Valaistukselle asetettavia vaatimuksia

Sisäurheilutilojen valonlähteiden valinnassa ratkaisevia tekijöitä ovat väriominaisuuksien kannalta värintoisto ja värilämpötila, taloudellisuuden kannalta polttoikä, valotehokkuus sekä myöskin valaisimien ja lamppujen hankintahinnat. Lamppujen jälleensyttymisajan tulisi olla mahdollisimman lyhyt. Valaisimien valinnassa ja sijoittamisessa on kiinnitettävä huomiota myös huoltoystävällisyyteen.

Väritelevisiointi asettaa valaistukselle omat vaatimuksensa. Yleisradion urheiluväri- ja valaistusta koskeissa suosituksissa väritelevisiointia ja värielokuvausta varten edellytetään valonlähteiden yleisen värintoistoindeksin olevan $R_a > 70$. Suositusten mukaan värilämpötilan tulee olla 3000 ... 3500 K tiloissa, joihin ei pääse päivänvaloa ja 5000 ... 7000 K tiloissa, joihin pääsee päivänvaloa. Suositusten mukaan lamppujen jälleensyttymisajan tulee olla mahdollisimman lyhyt [72].

9.5.2 Monimetallilamput

Jäähallien valonlähteiden valinta perustuu pitkälti väritelevisiointiin ja taloudellisuuden vaatimuksille. Jäähallien valaistukseen soveltuvat erityisesti dysprosium-pohjaiset monimetallilamput, joiden värilämpötila on 5000 - 6000 K ja yleinen värintoistoindeksi $R_a > 90$. Nämä lamput täyttävät hyvin väritelevisiointiin asettamat vaatimukset. Jäähallien valaistuksessa tavallisimmin käytetty monimetallilamppujen lampputeho on 1 000 W, mutta myös 400 W lamppuja käytetään. Lamppujen valotehokkuus on luokkaa 65 - 75 lm/W. Näiden lamppujen, kuten kaikkien monimetallilamppujen haittapuolena on pitkä jälleensyttymisaika. Tällöin on syytä järjestää monimetallilamppuvalaistuksen rinnalle jännitekatkoista riippumaton varavalaistus. Toinen vaihtoehto on varustaa monimetallilamput välittömän jälleensyttymisen mahdollistavalla sytytyslaitteella, joka tosin soveltuu vain kaksikantaisille lampuille [72].

Uimahallien vuotuinen aukioloaika on pitkä ja siten myös valonlähteiden vuotuinen polttoaika on pitkä. Yksi uimahallien valonlähteiden valintaperusteista onkin pitkä polttoikä. Lamppujen pitkää polttoikää vaaditaan myös lampunvaihtokustannusten minimoimiseksi, sillä lamppujen vaihtoa vaikeuttaa

valaisimien hankala sijainti. Muita valintaperusteita ovat hyvät värintoist ominaisuudet, lämmin värisävy sekä korkea valotehokkuus. Uimahalleissa suositellaan käytettäväksi loistelamppuja ja monimetallilamppuja [72]. Monimetallilamput soveltuvat myös vedenalaiseen valaistukseen. Monimetallilamppujen valotehokkuudet ovat loistelamppuihin verrattuna samaa suuruusluokkaa, mutta monimetallilamppujen polttoiät ovat alhaisempia kuin loistelamppujen. Uimahalleissa käytetään tavallisimmin 250, 400 ja 1 000 W monimetallilamppuja. Myös pienempitehoisia lamppuja käytetään. Esimerkiksi Kokkolan uimahallin yleisvalaistus on toteutettu kaksikantaisilla 70 W monimetallilampuilla [73]. Kokkolan uimahallin valaistusratkaisun valinnassa painotettiin tilan viihtyisyyttä, johon nähden monimetallilampun etuja olivat lämmin värisävy (3000 K) ja hyvät värintoisto-ominaisuudet, lisäksi lampun etuna on hyvä valotehokkuus. Monimetallilamppujen valaisimeksi uimahalleissa soveltuvat joko laajasäteilijät tai valonheittimet.

Tennishallien valonlähteiksi suositellaan kylmän tai neutraalin värisävyn lamppuja. Tavallisimmin käytetään neutraalisävyisiä loistelamppuja tai kylmäsävyisiä monimetallilamppuja [72]. Tennishalleissa tavallisimmin käytetyt monimetallilamppujen lampputehot ovat 400 ja 1 000 W. Tennishallien valaistus voidaan toteuttaa myös epäsuorana valaistuksena, jossa valonlähteinä ovat monimetallilamput. Tällöin on valaisimien hyötysuhteen oltava korkea ja on käytettävä valotehokkaita lamppuja. Valaistuksen onnistumisen ratkaisee myös katon tasaisuus sekä oikea heijastumissuhde.

9.5.3 Värikorjatut suurpainenatriumlamput

Värintoistoindeksin $R_a = 60 \dots 65$ ja värilämpötilan 2150 ... 2200 K omaavat värikorjatut suurpainenatriumlamput eivät täytä väritelevisioidinnin valaistukselle asettamia vaatimuksia, mikä rajoittaa näiden lamppujen käyttöä sisäurheilutiloissa. Niitä voidaan kuitenkin ajatella valonlähteiksi esimerkiksi uimahalleihin, joissa arvostetaan lämmintä värisävyä. Lamppujen etuja ovat vastaavantehoisia monimetallilamppuja korkeampi valotehokkuus sekä pidempi polttoikä.

Myös värintoistoindeksin $R_a > 80$ omaavien värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valo on lämminsävyistä värilämpötilan ollessa 2500 K. Näiden lamppujen teholuokat (35, 50 ja 100 W) ovat ainakin toistaiseksi niin pieniä, etteivät ne sovellu korkeiden urheiluhallien valonlähteiksi. Toisaalta ei näillä lampuilla

koskaan saavutettane käyttökohteita sisäurheilutilojen valaistuksessa, sillä tämän lampputyypin polttoikä ja valotehokkuus suurillakin lampputehoilla jäävät alhaisemmaksi kuin värintoistoindeksin $R_a = 60 - 65$ omaavilla suurpainenatriumlampuilla. Kun taas valaistuksen tulee täyttää väritelevisioinnin asettamat vaatimukset, on syytä käyttää monimetallilamppuja.

9.6 Ulkotilojen urheilualueet

9.6.1 Valaistukselle asetettavia vaatimuksia

Ulkotilojen urheilualueiden (yleisurheilu-, jalkapallo-, jääkiekko- ja tenniskentät, luisteluradat, raviradat) valonlähteiden valinnassa painotettavia arvoja ovat valaistuksen taloudellisuuden kannalta lamppujen valotehokkuus ja polttoikä sekä lamppujen ja valaisimien hankintakustannukset. Lamppujen tulee syttyä moitteettomasti myös alhaisissa lämpötiloissa ja niiden toiminnan tulee olla vakaata erilaisissa ympäristön lämpötiloissa. Lamppujen jälleensyttymisaajan tulisi olla mahdollisimman lyhyt. Tietyn lampputyypin etuja ovat myös sen laaja tehovalikoima.

Ulkotilojen urheilualueiden valaisimet ovat usein valonheittäjiä, jolloin valon suunnattavuuden takia on etua lampun valokappaleen pienestä koosta. Ulkokenttien vajjeriripustusasennuksissa käytetään valaisimina syväsiteilijöitä.

Väritelevisiointi ja -filmaus asettavat myös omat vaatimuksensa ulkotilojen urheilualueiden valaistukselle. Yleisradion urheiluvalaistusta koskevien suositusten mukaan tulee valon yleisen värintoistoindeksin olla $R_a > 70$. Ulkoalueilla suositellaan valon värilämpötilan olevan välillä 5000 ... 7000 K ja värilämpötilan toleranssin olevan ± 500 K. Suositusten mukaan kuitenkin värilämpötilan absoluuttinen arvo ei ole niinkään tärkeä kuin värilämpötilan tasaisuus sekä ajan että paikan suhteen. Suositusten mukaan lamppujen jälleensyttymisaajan on oltava mahdollisimman lyhyt [72].

9.6.2 Monimetallilamput

Monimetallilamput ovat väriominaisuuksiensa takia hyvä ratkaisu valaistaessa ulkokenttiä, joissa keinovalo sekoittuu päivänvaloon. Dysprosium-pohjaisten

monimetallilamppujen värilämpötila (5000 - 6000 K) on lähellä päivänvaloa ja lamppujen värintoisto-ominaisuudet ovat hyvät ($R_a > 90$). Lamput täyttävät väritelevisioidinnin valaistukselle asettamat väri vaatimukset. Myös muut monimetallilampputyypit soveltuvat valonlähteiksi urheilukentille, joissa täytyy huomioida myös väritelevisioidinnin vaatimukset. Helsingin Olympiastadionin valaistuksessa on halogeenilamppujen rinnalla käytetty 2 000 W monimetallilamppuja, joiden värilämpötila on 4 100 K ja jotka kuuluvat värintoistoluokkaan 2 [74].

Monimetallilamppujen tehovalikoima on laaja. 250 - 3500 W monimetallilamppujen valotehokkuudet ovat luokkaa 60 - 85 lm/W. Ympäristön lämpötilan vaikutus monimetallilamppujen toimintaan on vähäistä, lamput syttyvät moitteettomasti myös alhaisissa lämpötiloissa. Monimetallilamppujen polttoiät ovat alhaisemmat kuin tavallisten tai väri korjattujen suurpainenatriumlamppujen tai elohopealamppujen polttoiät.

Monimetallilamppujen haittapuolia ovat niiden herkkyyks jännitevaihteluille sekä pitkät jälleensyttymisajat. Niillä urheilukentillä ja raviradoilla, joissa monimetallilamput ovat ainoita valonlähteitä, on lamppujen jälleensyttymisajoista johtuen syytä varustaa osa lampuista pikasytyttimellä (soveltuvat kaksikantaisille lampuille) tai tai syöttää osaa lampuista varavoimaverkosta. Yksi mahdollisuus on käyttää osassa valaisimia välittömästi syttyviä halogeenilamppuja [72].

9.6.3 Väri korjatut suurpainenatriumlamput

Väri korjatut suurpainenatriumlamput ($R_a = 60 \dots 65$) eivät täytä väritelevisioidinnin valaistukselle asettamia väri vaatimuksia. Ne soveltuvat kuitenkin valonlähteiksi urheilukentille, joissa valon ei tule täyttää väritelevisioidinnin asettamia korkeita vaatimuksia, mutta joissa kuitenkin arvostetaan hyvää värintoistoa. Lamppujen etuja ovat tavallista elohopealamppua ja tavallista suurpainenatriumlamppua parempi värintoisto sekä korkea valotehokkuus (70 ... 86 lm/W). Näiden väri korjattujen suurpainenatriumlamppujen etuja vastavantehoisiin monimetallilamppuihin nähden ovat korkeampi valotehokkuus ja pidempi polttoikä. Lamppujen tehovalikoima on suppea suurimman lampputehon ollessa 400 W.

Eräs väri korjatuille suurpainenatriumlampuille ($R_a = 60 \dots 65$) erityisesti soveltuva käyttökohde ovat punaiset massapäällysteiset ulkotenniskentät. Lamppujen valo toistaa miellyttävän lämminsävyisinä punaiset massapäällysteet, joilla monimetallilampun valo koetaan liian kylmänä.

9.7 Kaupunkivalaistus

9.7.1 Valaistukselle asetettavia vaatimuksia

Kaupunkivalaistuksen piiriin kuuluvat lähinnä ydinkeskustojen alueilla olevat ajoradat ja jalkakäytävät, rakennukset, aukiot, puistot, muistomerkit, puut ym. Kaupunkivalaistus on osa kaupunkikuvaa, jolloin valaistuksen tulee soveltua arkkitehtuuriin ja valaistuksen suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota myös viihtyvyyteen. Kaupunkivalaistuksessa yhdistyvät sekä hyöty- että tehoste- ja koristevalaistus ja kunkin valaistuskohteen valonlähteille asettamat värivaatimukset määräytyvät osittain tapauskohtaisesti. Julkisivuvalaistuksessa valon yleisvärisävyn ja valonlähteiden värintoisto-ominaisuuksien tulee olla sopusoinnussa julkisivun materiaalien ja värien kanssa [72].

Kaupunkivalaistuksessa käytettävien lamppujen tulee kestää erilaisia sääolosuhteita ja lamppujen tulee syttyä myös alhaisissa lämpötiloissa. Valaisimien ja lamppujen on oltava mekaanisesti kestäviä. Julkisivujen ja muistomerkkien valaistuksessa käytetään paljon valonheittimiä, jolloin valon suunnattavuuden kannalta on tärkeää lampun valokappaleen pieni koko. Lampun vapaan polttoasennon etuna on mahdollisuus suorittaa valonheittimen lopullinen suuntaaminen asennuspaikalla.

9.7.2 Monimetallilamput

Monimetallilamppujen etuna kaupunkivalaistuksen valonlähteiksi ovat hyvät väriominaisuudet, korkea valotehokkuus sekä laaja tehovalikoima. Lamput soveltuvat ulkokäyttöön. Kierrekantaisten monimetallilamppujen hankintahinnat ovat samaa luokkaa kuin samantehoisten tavallisten suurpainenatriumlamppujen ja hiukan alhaisemmat kuin samantehoisten värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen. Monimetallilamppujen haittapuolia ovat muihin purkauslampuihin verrattuna lyhyemmät polttoiät sekä useimmiten myös rajoitettu polttoasento.

Kierrekantaiset, kirkaskupuiset monimetallilamput soveltuvat myös valonheitinkäyttöön. Myös kaksikantaiset monimetallilamput soveltuvat kaupunkivalaistuksen valonheitinkäyttöön. Tämän lampun suhteellisen pieni koko helpottaa

valon suuntausta. Asennuspaikalla tapahtuvaa valonheittimen vapaata suuntaamismahdollisuutta rajoittaa kuitenkin lampun polttoasento, jonka sallittu vaihtelualue vaakatasosta on $\pm 45^\circ$. Kaksikantaisten monimetallilamppujen hankintahinnat ovat kierrekantaista monimetallilamppuja korkeammat.

DC-käyttöinen 32 W monimetallilamppu ei sovellu ulkokäyttöön, sillä lampun elektronisen liitäntälaitteen toimintalämpötila-alue on $-10 \dots +50^\circ\text{C}$.

9.7.3 Värikorjatut suurpainenatriumlamput

Värikorjatut suurpainenatriumlamput ($R_a = 60 \dots 65$) ovat suhteellisen uusi, varteenotettava vaihtoehto kaupunkivalaistuksen valonlähteiksi. Lamppujen valo on lämminsävyistä ja värintoisto-ominaisuudet ovat paremmat kuin tavallisella elohopealampulla ja tavallisella suurpainenatriumlampulla. Monimetallilamppuun nähden näiden värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen etuja ovat korkeampi valotehokkuus, pidempi polttoikä sekä vapaa polttoasento. Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen toimintaan eivät erilaiset ympäristön lämpötilat vaikuta. Lamppujen hankintahinnat ovat hieman suurempia kuin vastaavantehoisten yksikantaisten monimetallilamppujen tai tavallisten suurpainenatriumlamppujen. Näiden lamppujen tehovalikoima on ainakin toistaiseksi suppea (150, 250 ja 400 W).

Värintoistoindeksin $R_a > 80$ omaavat värikorjatut suurpainenatriumlamput ovat myös yksi vaihtoehto kaupunkivalaistuksen valonlähteiksi, kun halutaan hyvän värintoiston omaavaa, lämminsävyistä valoa. Lampputehot ovat ainakin toistaiseksi (35 - 100 W) useimmissa tapauksissa liian pieniä ulkoalueiden valaistukseen. Lampputehojen mahdollisesti kasvaessa on kuitenkin muistettava, että tämän lampputyypin valotehokkuus ja polttoikä jäävät aina alhaisemmiksi kuin värintoistoindeksin $R_a = 60 \dots 65$ omaavan värikorjatun suurpainenatriumlampun. Lampun etuihin kuuluu suurpainenatriumlampuille ominainen vapaa polttoasento.

9.8 Ulkotyöalueet

9.8.1 Valaistukselle asetettavia vaatimuksia

Erilaisten ulkotyöalueiden (tehdasalueet, varastoalueet, satamat, ratapihat, rakennustyömaat, huoltoasemat, lentokentät) valaistukselle asettamat vaatimukset ovat hieman erityyppisiä. Useimpien ulkotyöalueiden valaistuksessa voidaan valon värintoistoindeksiä $R_a = 20 \dots 60$ pitää riittävänä. On kuitenkin alueita, joilla valolta vaaditaan hyvää värintoistoa [72].

Valaistaessa suuria alueita tulevat yleensä kysymykseen korkealle asennettavat valonheittimet, joihin soveltuvat kirkaskupuiset sylinterinmuotoiset purkauslamput. Matalalle asennettaviin valaisimiin sopivat yleensä ellipsoidin muotoisella ulkokuvulla varustetut lamput. Lamppujen valotehokkuuden tulee olla korkea ja taloudellisen polttoajan pitkä. Lamppujen tulee syttyä moitteettomasti myös pakkasolosuhteissa ja niiden ominaisuuksien tulee säilyä vakaina erilaisissa ympäristöolosuhteissa. Lamppujen ja valaisimien tulee olla mekaanisesti kestäviä. Lamppujen vapaan polttoasennon etuna on valaisimen vapaa suuntaamismahdollisuus asennuspaikalla.

9.8.2 Monimetallilamput

Monimetallilamput etuja ulkotyöalueiden valaistukseen ovat laaja tehovalikoima, korkea valotehokkuus sekä hyvät värintoisto-ominaisuudet. Kohteisiin, joissa halutaan hyvää päivänvalon kaltaista värintoistoa, ovat monimetallilamput purkauslampuista parhaiten soveltuvia valonlähteitä. Monimetallilamppu syttyy moitteettomasti myös alhaisissa lämpötiloissa. Ympäristön lämpötilan vaikutus lamput toimintaan ja valontuottoon on vähäistä.

Esimerkiksi elohopealamppuun verrattuna ovat monimetallilamppujen hankintahinnat korkeita. Olosuhteissa, joissa lamppujen rikkoutumistodennäköisyys on suuri (esimerkiksi rakennustyömaat), monimetallilamppujen käyttöä työmaavalauksessa rajoittaakin niiden korkea hankintahinta. Monimetallilamput haittapuolia ovat herkkyys verkkojännitevaihteluille sekä muiden purkauslamppujen lailla pitkä jälleensyttymisaika. Tietyillä ulkotyöalueilla on valaistuksen taattava turvallinen liikkuminen alueella myös jännitekatkon sattuessa. Tällöin on ainakin osa valaisimista varustettava välittömän jälleensyttymisen

mahdollistavalla sytytyslaitteella tai normaalin valaistuksen rinnalle on kytkettävä hehku- tai halogeenilamppuvalaisimia.

Monimetallilampun haittapuolia ovat useimmilla lampputyypeillä rajoitettu polttoasento, mikä rajoittaa valonheittimien vapaata suuntaamista.

9.8.3 Värikorjatut suurpainenatriumlamput

Värintoistoindeksin $R_a = 60...65$ omaavat värikorjatut suurpainenatriumlamput soveltuvat myös ulkotyöalueiden valonlähteiksi, kun halutaan tavallista suurpainenatriumlamppua tai elohopealamppua parempaa värintoistoa. Nämä värikorjatut suurpainenatriumlamput eivät kuitenkaan tuo parannusta em. lamppuihin nähden tapauksissa, joissa halutaan hyvää päivänvalon kaltaista värintoistoa. Tällöin jäävät monimetallilamput purkauslampuista ainoiksi vaihtoehtoiksi. Monimetallilamppuihin verrattuna näiden värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen etuina ovat korkeampi valotehokkuus ja pidempi polttokä.

Vaikka korkeampaan värintoistoluokkaan ($R_a > 80$) kuuluvien värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen etuna em. lamppuihin nähden on parempi värintoistokyky, on näidenkin lamppujen valon väri kaukana päivänvalosta värilämpötilan ollessa 2500 K. Lamppujen yksikkötehot ovat ainakin toistaiseksi pieniä (35 - 100 W). Vaikka teholuokat tulevaisuudessa nousisivatkin, jäävät lamppujen valotehokkuudet ja polttoiät pienemmäksi kuin alhaisemman värintoiston omaavien värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen, joten ne eivät ole taloudellinen vaihtoehto ulkotyöalueiden valonlähteiksi.

9.9 Teollisuustilat

9.9.1 Valaistukselle asetettavia vaatimuksia

Useimmissa teollisuuden tiloissa valon värilämpötilalla ja värintoist ominaisuuksilla ei ole suurta merkitystä. Yleensä riittää tyydyttävä värintoisto ($40 \leq R_a \leq 60$). Tiettyjen teollisuuden alojen (tekstiili- ja graafinen teollisuus, maalaamot) työtiloissa vaaditaan kuitenkin erittäin hyvää värintoistoa ($R_a \geq 80$) [71].

Tärkeimpiä teollisuusvalaistuksen valonlähteiden valintaperusteita on taloudellisuus, jolloin ratkaisevia ovat lamppujen polttoikä ja valotehokkuus sekä myöskin lamppujen ja valaisimien hankintahinnat. Kolmivuorotyötä tehtäessä muodostuu valaistuksen vuotuiseksi käyttöajaksi 8 000 tuntia. Tällöin on ilmeistä, että lamppujen hankinta- ja vaihtokustannusten minimoimiseksi tulee lamppujen polttoiän olla mahdollisimman pitkä.

Lampputyyppejä valittaessa on syytä kiinnittää huomiota myös lampun syttymisaikaan, jälleensyttymisaikaan sekä jännitekatkosten ja -vaihteluiden sietokykyyn. Esimerkiksi nostureissa olevien suurten moottoreiden käynnistäminen saattaa aiheuttaa verkossa äkillisen jännitetason alenemisen, jonka seurauksena monimetallilamput ja suurpainenatriumlamput sammuvat. Lisäksi monimetallilamput ja suurpainenatriumlamput ovat herkkiä verkkojännitevaihteluille. Tietyissä teollisuustiloissa tulee huomioida myös valaistuksen säätömahdollisuus.

Lamppujen vapaan polttoasennon etuna on valonlähteen vapaa suuntaamismahdollisuus valonheittimessä.

Korkeissa teollisuustiloissa käytetään purkauslamppujen yhteydessä yleensä syväsäteileviä, voimakkaasti valoa keskittäviä valaisimia. Matalahkoissa tiloissa käytetään jonkin verran laajasäteilijöitä purkauslamppuvalaisimina.

9.9.2 Monimetallilamput

Monimetallilampuista teollisuuden sisätilojen valaistuksessa käytetään lähinnä 250 ja 400 W kierrekantalamppuja, joiden ulkokupu on ellipsoidin tai sylinterin muotoinen. Lamppujen värilämpötila on välillä 3500 ... 6000 K ja yleinen

värintoistoindeksi $R_a = 65 \dots 90$. Lamppujen valotehokkuus on $60 - 75 \text{ lm/W}$ ja taloudellinen elinikä luokkaa $6000 \dots 8000$ tuntia. Monimetallilamput soveltuvat korkeisiin tiloihin (valaisimen asennuskorkeus $> 5 \text{ m}$) [75].

Monimetallilamppujen etuja ovat suurehko valotehokkuus ja hyvä värintoisto. Teollisuustiloihin, joissa valon värintoistolle asetetaan korkeat vaatimukset, ovat monimetallilamput ainoita soveltuvia suurpaineisia purkauslamppuja. Monimetallilampun haittapuolia on suhteellisen lyhyt taloudellinen elinikä, esimerkiksi teollisuustiloissa käytettävien elohopealamppujen taloudelliset eliniät ovat noin kaksinkertaisia vastaaviin monimetallilamppuihin nähden [75].

Tietyissä teollisuustiloissa on tarvetta valaistustason säätöön. Monimetallilampun yhteydessä on muistettava, että sen valon väriominaisuudet muuttuvat voimakkaasti säädinkäytössä. Myös normaalit verkkojännitevaihtelut saattavat aiheuttaa monimetallilampun valon värin muuttumista.

Markkinoilla on teollisuuskäyttöön tarkoitettuja valonheittimiä, joissa valon suuntaaminen voidaan suorittaa kääntämällä valaisinta kahden akselin suuntaan toimivan nivelen avulla. Rajoitetun polttoasennon omaavien monimetallilamppujen käyttö tällaisissa valaisimissa aiheuttaa erikoisjärjestelyjä valaisimen rakenteen suhteen.

9.9.3 Värikorjatut suurpainenatriumlamput

Värikorjatut suurpainenatriumlamput, joiden värintoistoindeksi $R_a = 60 \dots 65$, soveltuvat myös teollisuuden sisätilojen valonlähteiksi. Lamppujen värintoistominaisuudet ovat riittävät useisiin teollisuustiloihin. Alhaisesta värilämpötilasta ($2150 - 2200 \text{ K}$) johtuen valon väri on kuitenkin kellertävää.

Toistaiseksi on näiden värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen käyttö teollisuuden tuotantotiloissa vähäistä. Lamput ovat kuitenkin varteenotettava vaihtoehto valaistusratkaisua suunniteltaessa. Lamppujen etuina ovat tavallista elohopalamppua ja tavallista suurpainenatriumlamppua parempi värintoisto sekä monimetallilamppua korkeampi valotehokkuus ($70 - 86 \text{ lm/W}$). Myös lamppujen polttoikä on monimetallilamppuja korkeampi. Käytännön kokemuksia taloudellisesta eliniästä teollisuuskäytössä ei kuitenkaan vielä ole [75].

Myös värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen ($R_a = 60 \dots 65$) väriominaisuudet muuttuvat valovirtaa säädettäessä valon alkaessa alhaisilla valovirran

arvoilla muistuttaa tavallisen suurpainenatriumlampun keltaista valoa. Valon värin suhteelliset muutokset säädinkäytössä ovat kuitenkin pienempiä kuin monimetallilampuilla.

9.10 TV- ja studiovalaistus

9.10.1 Monimetallilamput

Erikoisrakenteiset monimetallilamput (luku 3.1.7.3) on kehitetty nimenomaan televisioinnin ja filmauksen tarpeita vastaaviksi. Lamput soveltuvat erilaisiin valonheitinkäyttöihin. Lamppujen purkauskanavan kirkkaus on suuri ja valotehokkuus ilman liitäntälaitehäviöitä on tyypillisesti 80 - 100 lm/W , muutamien lampputyyppeiden valotehokkuus on 55 - 60 lm/W. Korkean valotehokkuuden ja purkauskanavan kirkkauden johdosta valo saadaan kohdistettua tehokkaasti haluttuun paikkaan. Lampuille on ominaista jatkuva spektri ja lähellä päivänvaloa oleva valon väri, värilämpötila on luokkaa 5500 - 6000 K ja värintoistoindeksi $R_a > 85$. Lamppujen tehoalue on 200 - 12 000 W. Lamppuja käytetään sekä sisä- että ulkokäytössä.

Näiden monimetallilamppujen spektri sisältää runsaasti säteilyä myös UV-alueella, mikä tulee lamppujen käytön yhteydessä huomioda. Suoraa altistumista valolle tulee välttää.

Purkausputken korkeasta tehokuormituksesta johtuen lamppujen elinikä on lyhyt, tyypillisesti välillä 250 - 1000 tuntia. Lampputyypeistä löytyy sekä vapaan että rajoitetun polttoasennon omaavia lamppuja. Lamput soveltuvat käytettäväksi pikasytytyslaitteen kanssa, jolloin esimerkiksi jännitekatkoksen seurauksena sammunut lamppu voidaan sytyttää välittömästi [34].

9.11 Yhteenveto

Monimetallilampuille ja värikorjatuille suurpainenatriumlampuille löytyy useita erityyppisiä käyttökohteita sekä sisä- että ulkovalaistuksessa. Eri käyttökohteiden valonlähdevalintoja tehtäessä on kiinnitettävä huomiota kunkin lampputyypin etuihin ja haittoihin. Monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen haittapuoliin kuuluu herkkyys jännitevaihteluille sekä sammuminen jännitekatkoksissa ja äkillisissä jännitetason putoamisissa. Lisäksi lampuille ovat ominaisia tietyt syttymis- ja jälleensyttymisajat. Kaksikantaisten ja erikoiskannalla varustettujen yksikantaisten monimetallilamppujen käytön yhteydessä on kiinnitettävä huomiota lamppujen UV-säteilyn tuottoon.

Myymälätilojen valonlähteinä monimetallilamppujen ja värintoistoindeksin $R_a > 80$ omaavien värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen etuja ovat hyvät värintoisto-ominaisuudet, korkea valotehokkuus sekä pitkä polttoikä. Lamput soveltuvat sekä yleis- että kohdevalaistukseen. Lamppujen hankintahinnat ovat korkeat myymälävalaistuksessa paljon käytettyihin halogeenilamppuihin verrattuna. Monimetallilamppujen ja näiden värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen haittapuoliin kuuluu huono soveltuvuus säädinkäyttöön.

Julkisten tilojen valaistukseen lämminsävyiset monimetallilamput sekä värikorjatut suurpainenatriumlamput tarjoavat vaihtoehtoisen valaistusratkaisun näissä tiloissa paljon käytettyihin hehku-, pienloiste- ja loistelamppuihin nähden.

Toimistotilojen ja koulujen valaistus voidaan loistelamppujen sijaan toteuttaa esimerkiksi epäsuoralla valaistusperiaatteella kaksikantaisten monimetallilamppujen avulla. Monimetallilamput soveltuvat myös toimistotilojen ja koulujen suoraan valaistukseen. Sen sijaan värikorjattuja suurpainenatriumlamppuja ei väriominaisuuksiensa vuoksi voida yleensä pitää sopivina näiden tilojen valonlähteiksi. Monimetallilamppujen etuja toimistotilojen ja koulujen valonlähteiksi ovat hyvät väriominaisuudet ja korkea valotehokkuus. Monimetallilamppujen polttoajat ovat lyhyemmät kuin näissä tiloissa paljon käytettyjen loistelamppujen. Monimetallilamppujen yksikköhinnat ovat suhteellisen korkeat.

Monimetallilamppujen käyttöä erilaisten sisäurheilutilojen valonlähteenä puoltavat lamppujen korkea valotehokkuus sekä pitkäikäinen polttoikä. Lamppujen tehovalikoima on laaja. Monimetallilamput täyttävät väritelevisioinnin valaistukselle asettamat vaatimukset. Värintoistoindeksin $R_a = 60 \dots 65$ omaavat

värikorjatut suurpainenatriumlamput soveltuvat valonlähteiksi sisäurheilutiloihin, joissa valon ei tule täyttää väritelevisioidinnin valaistukselle asettamia vaatimuksia. Näiden lamppujen etuja ovat samantehoisia monimetallilamppuja korkeampi valotehokkuus sekä pidempi polttoikä. Monimetallilamput ja värikorjatut suurpainenatriumlamput ($R_a = 60 \dots 65$) soveltuvat myös ulkotilojen urheilualueiden valonlähteiksi. Ympäristön lämpötilan vaikutus lamppujen toimintaan on vähäistä.

Sekä monimetallilamput että värikorjatut suurpainenatriumlamput tarjoavat vaihtoehtoon kaupunkivalaistuksen valonlähteitä valittaessa. Lamput soveltuvat myös valonheitinkäyttöön. Monimetallilamppujen etuna kaupunkivalaistuksen valonlähteeksi ovat hyvät väriominaisuudet, korkea valotehokkuus sekä laaja tehovalikoima. Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen ($R_a = 60 \dots 65$) valo on lämminsävyistä ja värintoisto-ominaisuudet ovat paremmat kuin tavallisella elohopealampulla tai tavallisella suurpainenatriumlampulla. Monimetallilamppuun nähden näiden lamppujen etuja ovat korkeampi valotehokkuus, pidempi polttoikä sekä vapaa polttoasento.

Ulkotyöalueille, joissa halutaan hyvää päivänvalon kaltaista värintoistoa, ovat monimetallilamput purkauslampuista parhaiten soveltuvia valonlähteitä. Monimetallilamppujen korkeat hankintahinnat rajoittavat kuitenkin lamppujen käyttöä ulkotyöalueiden valonlähteenä. Useimmille monimetallilampputyypeille ominainen rajoitettu polttoasento rajoittaa valonheittimien vapaata suuntaamista. Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen ($R_a = 60 \dots 65$) käyttöä ulkotyöalueiden valonlähteenä puoltavat lamppujen korkea valotehokkuus ja pitkä polttoikä.

Teollisuustiloihin, joissa valon värintoistolle asetetaan korkeat vaatimukset, ovat monimetallilamput ainoita soveltuvia suurpaineisia purkauslamppuja. Monimetallilampun haittapuolia muihin purkauslamppuihin verrattuna ovat suhteellisen lyhyet taloudelliset eliniät. Monimetallilampun säädinkäyttöä rajoittavat voimakkaat valon värimuutokset valovirran laskiessa. Värintoistoindeksin $R_a = 60 \dots 65$ omaavien värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen etuja teollisuustilojen valonlähteiksi ovat tavallista elohopealamppua ja tavallista suurpainenatriumlamppua parempi värintoisto sekä monimetallilamppuja korkeampi valotehokkuus ja pidempi polttoikä.

Erikoisrakenteiset monimetallilamput on kehitetty nimenomaan televisioidinnin ja filmauksen tarpeita vastaaviksi. Lamput soveltuvat erilaisiin valonheitinkäyttöihin.

10. Valaistuskustannukset

10.1 Yleistä

Seuraavassa tarkastellaan erilaisin valonlähdevalinnoin toteutettavan suurehkon tilan (30 m x 60 m) valaistuksen kustannuksia. Kaikissa ratkaisuissa asetetaan tilan keskimääräisen valaistusvoimakkuustason tavoitearvoksi 500 lx. Tilan käyttötarkoitusta ei ole tässä tarkastelussa määritelty, sillä kustannustarkastelussa on ensisijaisesti tarkoitus antaa kuva eri valonlähteillä toteutettujen valaistusasennusten kustannustekijöiden muodostumisesta sekä eri valonlähderatkaisujen kustannustekijöiden keskinäisistä eroista.

Tehtävän tarkastelun yhteydessä on muistettava, ettei pelkkä kustannusvertailu riitä valaistusratkaisun valonlähteiden valinnan perustaksi. Tilan käyttötarkoitus asettaa usein omat vaatimuksensa valon väriominaisuuksille, jotka kussakin yksittäistapauksessa on valonlähdevalintoja tehtäessä otettava huomioon. Muita valonlähteiden valinnassa huomioonotettavia seikkoja voivat olla kohteen mukaan mm. lamppujen syttymis- ja jälleensyttymisajat, käyttäytyminen verkkojännitevaihteluissa ja jännitekatkoksissa, toiminta erilaisissa ympäristöolosuhteissa sekä mahdollinen säädinkäyttö. Koska tähän tarkasteluun valittujen valonlähteiden ominaisuudet poikkeavat osittain huomattavastikin toisistaan, on selvää, ettei pelkkä kustannusvertailu riitä asettamaan tarkastelun kohteena olevia lamppeja lampputyypin valintatilannetta varten minkäänlaiseen järjestykseen.

10.2 Lähtötiedot

Tarkastelun kohteena olevan tilan pinta-ala on 30 x 60 m² ja korkeus 9 m. Tilan keskimääräisen valaistusvoimakkuuden tulee kussakin tapauksessa olla 500 lx.

Valaisimien asennustapana käytetään pinta-asennusta kattoon. Kaikissa tapauksissa valaisimet ovat valaisinkohtaisesti kompensoituja.

Valaistuksen vuotuisena käyttöaikana käytetään laskelmissa 2 500 h/a.

10.2.1 Valonlähteet ja valaisimet

Tarkasteluun on otettu mukaan 250 W ellipsoidikupuinen monimetallilamppu, 250 W värikorjattu ellipsoidikupuinen suurpainenatriumlamppu, 250 W elohopealamppu sekä 58 W vakioloistelamppu (nk. kolmihuippulamppu). Taulukossa 10.1 on esitetty lamppujen kokonaistehot, valovirrat sekä polttoiät. Lamppujen kokonaistehot on saatu lisäämällä lampputehoon liitälaitteen kuluttama teho.

Purkauslamppujen polttoiät perustuvat valmistajalta saatuihin valovirran alenema- ja kuolleisuuskäyriin sekä valmistajan kanssa näiden pohjalta käytyyn keskusteluun. Koska purkauslamppujen polttoikien määrittelyssä on huomioitu lamppujen kuolleisuuden ohella myös valovirran alenema, ovat kyseessä lamppujen hyötypolttoiät. Koska eri lampuille ovat ominaisia erityyppiset valovirran alenema- ja kuolleisuuskäyrät, ei eri lamppujen polttoikien määrittelyssä voida esittää yhtenäisiä vaatimuksia kutakin polttoikää vastaavalle valovirran alenema- ja kuolleisuusprosentille. Seuraavassa ilmoitettavat valovirran alenemat ovat prosentuaalisia arvoja lamppujen 100 tunnin polton jälkeisestä valovirrasta. Lamppujen valovirran alenemat ovat vastaavista käyristä määritettyjä keskiarvoja. Värikorjatulle suurpainenatriumlampulle 10 000 tunnin polttoikää vastaava valovirran alenema on 20 %. Elohopealampun 12 000 tunnin polttoikää vastaava valovirran alenema on 20 %. Monimetallilampun 6 000 tunnin polttoikää vastaava valovirran alenema on 30 %. Loistelampun polttoikänä on käytetty 7 500 tuntia, mikä on valmistajan ilmoittama taloudellinen polttoikä valovirran aleneman ollessa 30 %. Loistelamppujen taloudellista polttoikää määritettäessä on valovirran aleneman ohella otettu huomioon myös lamppujen vaihtokustannusten vaikutus valaistuksen kokonaiskustannuksiin. Polttoikien määrittelyssä esiintyvät lamppujen erilaiset valovirran alenemaprosentit on huomioitu valaistusvoimakkuuslaskelmissa esiintyvän lamppujen valovirran alenemakertoimen avulla (yhtälö 10.1).

Taulukko 10.1 Valaistuskustannuslaskelmissa käytettävät lamput, lampun ja tämän liitäntälaitteen kokonaisteho P_k , valovirta ϕ , valotehokkuus η sekä polttoikä t_p .

Lamppu	$P_k /$ W	$\phi /$ lm	$\eta = \frac{\phi}{P_k} /$ lm/W	$t_p /$ h
1. 250 W monimetallilamppu	275	17 000	62	6 000
2. 250 W värikorjattu suurpainenaatriumlamppu	275	22 000	80	10 000
3. 250 W elohopealamppu	266	13 000	49	12 000
4. 58 W loistelamppu	71	5 400	76	7 500

Purkauslamppujen (vaihtoehdot 1.- 3.) valaisimena käytetään laajasäteilijää, joka on tarkoitettu teollisuushallien, varastojen ja urheiluhallien valaisimiksi. Loistelamppuvalaisimena käytetään teollisuus- ja urheilutilojen valaisimiksi tarkoitettua yleisvalaisinta. Loistelamppuvalaisin on kolmelamppuinen ja purkauslamppuvalaisin on yksilamppuinen. Molemmat valaisimet on varustettu lamelliritilällä.

10.2.2 Valaistuslaskelmat

Valaistusvoimakkuuslaskelmissa käytetään hyötysuhdemenetelmää, jonka laskentatarkkuutta voidaan tässä tarkastelussa pitää riittävänä. Tarkkoja valaistuslaskelmia varten on syytä käyttää tietokoneella suoritettavia laskentaohjelmia.

Hyötysuhdemenetelmän perusyhtälö [61] on

$$E_m = \beta k_{25} k_{\phi} \eta_h \frac{N \phi}{A}, \quad (10.1)$$

jossa

E_m = keskimääräinen valaistusvoimakkuus työtasolla, 500 lx

β = lamppujen ja valaisimien sekä huonetilaa rajoittavien pintojen likaantumisesta johtuva alenemakerroin, 0.75

k_{25} = alenemakerroin, jolla otetaan huomioon loistelamppujen valovirran pieneneminen niiden joutuessa toimimaan optimilämpötilastaan poikkeavassa ympäristön lämpötilassa, 1.0

k_ϕ = alenemakerroin, joka ilmoittaa lamppujen vanhenemisen myötä tapahtuvan lamppujen valovirran pienenemisen

η_h = valaistushyötysuhde, valaisimen hyötysuhteen ja huoneen hyötysuhteen tulo

N = valaisimien lukumäärä

ϕ = yhdessä valaisimessa olevien lamppujen kokonaisvalovirta (lm)

A = huoneen pinta-ala, 30 x 60 m².

Alenemakertoimen β arvo on saatu olettamalla tilan likaantumislukokan olevan keskimääräinen, jolloin lähteen [61] mukaan voidaan laskelmissa käyttää edellä esitettyä arvoa.

Lamppujen vanhenemisen myötä tapahtuva lamppujen valovirran pieneneminen on erilaista eri lamppuille. Lamppujen valovirran alenemäkäyriä on tarkasteltu polttoikämäärytyksien yhteydessä edellisessä luvussa. Näihin alenemäkäyriin ja lamppujen kuolleisuuskäyriin perustuvien polttoikien määrittelyyn perustuen käytetään kertoimen k_ϕ arvoina seuraavassa monimetallilamppuille arvoa 0.7 ja värikorjatuille suurpainenaatrium- sekä elohopealamppuille arvoa 0.8. Loistelamppuille käytetään arvoa 0.7.

Koska kyseessä on sisätila (lämpötila 20 - 25°C), voidaan loistelamppujen alenemakerroin k_{25} jättää laskelmissa huomiotta asettamalla sen arvoksi $k_{25} = 1$.

Valaistushyötysuhteessa esiintyvän huoneen hyötysuhteen avulla otetaan huomioon heijastuvan valon osuus keskimääräiseen valaistusvoimakkuuteen. Tilan mittasuhteiden vuoksi voidaan heijastuvan valon osuus keskimääräiseen valaistusvoimakkuuteen tässä tapauksessa jättää huomiotta. Tällöin valaistushyötysuhteena on käytetty suoraan valaisimen hyötysuhdetta. Valitun loistelamppuvalaisimen hyötysuhde on $\eta_h = 0.58$ ja purkauslamppuvalaisimen hyötysuhde kaikille ellipsoidikupuisille purkauslamppuille on $\eta_h = 0.59$.

Loistelamppuvalaisin on kolmelamppuinen, jolloin yhdessä valaisimessa olevien lamppujen kokonaisvalovirta saadaan kertomalla lampun valovirta kolmella. Purkausalamppuvalaisin on yksilamppuinen.

Keskimääräisen valaistusvoimakkuuden tavoitearvon saavuttamiseksi tarvittava valaisinmäärä N kussakin eri tapauksessa saadaan perusyhtälön avulla seuraavasta yhtälöstä

$$N = \frac{E_m A}{\beta k_{25} k_{\phi} n \phi} \quad (10.2)$$

Kun eri valonlähteitä vastaavat valovirrat ja valaisimien hyötysuhteet sijoitetaan yhtälöön 10.2, saadaan määritettyä kussakin vaihtoehdossa tarvittavat valaisinmäärät, jotka on esitetty taulukossa 10.2. Taulukosta 10.2 käy myös ilmi kunkin eri vaihtoehdon valaistuksen kokonaisteho sekä valaistuksen kokonaisteho pinta-alayksikköä kohti.

Taulukko 10.2 Kussakin vaihtoehdossa tarvittava valaisimien lukumäärä N , valaistuksen kokonaisteho $P_{v,k}$ sekä valaistuksen tehotiheys $P_{v,t}$.

Valonlähde	N	$P_{v,k} / W$	$P_{v,t} / \frac{W}{m^2}$
1. Monimetallilamppu	171	47.03	26.13
2. Värikorjattu suurpainenatriumlamppu	116	31.90	17.72
3. Elohopealamppu	196	52.14	28.96
4. Loistelamppu	182	38.77	21.54

10.2.3 Kustannustiedot

10.2.3.1 Lamput ja valaisimet

Lamppujen ja valaisimien hintoina on käytetty taulukon 10.3 mukaisia hintoja. Lamppujen hinnat on saatu laskemalla ohjehinnoista 50 % tukkualennuksen mukainen hinta. Loistelamppuvalaisimen tukkualennusprosenttina on käytetty 48 % ja purkausalamppuvalaisimen tukkualennusprosenttina on käytetty 35 %.

Vaikka eri purkausalampuille käytetään samaa valaisintyyppiä, muodostuu valaisimen hinta monimetalli- ja suurpainenatriumlamppukäytössä elohopealamppukäyttöä korkeammaksi erilaisista liitäntälaitteista johtuen.

Taulukko 10.3 Laskelmissa käytetyt lamppujen, H_l , ja valaisimien, H_v , hinnat.

Valonlähde	Lampun hinta H_l /mk	Valaisimen hinta H_v / mk
1.Monimetallilamppu	225.00	891
2.Värikorjattu suurpainenatrium- lamppu	250.00	891
3.Elohopealamppu	80.00	554
4.Loistelamppu	38.50	711

10.2.3.2 Asennuskustannukset

Valaisimien asennuskustannustiedot on saatu Suomen Sähköurakoitsijaliitosta. Asennuskustannuksissa on työkustannusten osalta huomioitu kunkin valaisimen vaatima johdotustyö (keskimäärin 7 m johtoa valaisinta kohti) sekä valaisimen kiinnitystyö. Kustannuksissa on otettu huomioon asennuskorkeudesta aiheutuvat korotukset jouduttaessa tekemään työtä siirrettävillä telineillä. Johdotus-
tarvikkeet sisältyvät asennuskustannuksiin. Asennustapana käytetään pinta-
asennusta kattopintaan.

Loistelamppuvalaisimen asennuskustannuksiksi on saatu 604 mk ja purkaus-
lamppuvalaisimen asennuskustannuksiksi 608 mk.

10.2.3.3 Energiakustannukset

Valaistuksen energiakustannukset riippuvat sähköenergian ostotariffista, valais-
tuksen kokonaistehosta sekä valaistuksen vuotuisesta käyttöajasta.

Koska tarkastellun tilan valaistusteho on suhteellisen suuri, on kohteen sähkö-
energian ostotariffiksi oletettu keskisuurille kuluttajille tarkoitettu piejännite-
tehotariffi. Energiamaksuna on tällöin käytetty 0.27 mk/kWh, mikä on HKE:n
piejännitetehotariffin mukainen energiamaksu 1.12.1989 alkaen.

Valaistuksen kokonaistehoa laskettaessa on otettava huomioon myös lamppujen
kuristinhäviöt. Kunkin lampputyypin kokonaisteho käy ilmi taulukosta 10.1.

Valaistuksen vuotuisena käyttöaikana käytetään 2 500 h/a.

10.2.3.4 Huoltokustannukset

Valaistuksen huoltokustannuksiin kuuluvat lamppujen vaihtokustannukset sekä
valaisimien puhdistuskustannukset.

Tilan korkeudesta ja valaisinmääristä johtuen on lamppujen vaihto edullista
suorittaa ryhmävaihtona. Useille siivousliikkeille tehdyn kustannustiedus-
telun tuloksena käytetään lamppujen vaihtokustannuksina ryhmävaihdossa

20 mk/lamppu. Tähän hintaan kuuluu myös valaisimen heijastimen puhdistus sekä loistelamppujen sytyttimen vaihto. Koska loistelamppuvalaisimessa on kolme lamppua yhtä valaisinta kohti, on loistelamppuvalaisimen vaihto- ja puhdistuskustannuksiksi arvioitu 40 mk/lamppu. Loistelamppujen sytyttimet vaihdetaan jokaisella lamppujen vaihtokerralla. Sytyttimen hintana käytetään 4.25 mk.

Lamppujen ryhmävaihtoväli saadaan jakamalla lamppujen polttoikä niiden vuotuisella käyttöajalla. Näin eri lampputyypin ryhmävaihtoväliksi, t_r , saadaan:

Vaihtoehto 1 (monimetallilamput) : $2.4 \text{ a } (6000 \text{ h } / 2500 \frac{\text{h}}{\text{a}})$

Vaihtoehto 2 (värikorj. suurpainenaatriumlamput) : $4.0 \text{ a } (10\,000 \text{ h } / 2500 \frac{\text{h}}{\text{a}})$

Vaihtoehto 3 (elohopealamput) : $4.8 \text{ a } (12\,000 \text{ h } / 2500 \frac{\text{h}}{\text{a}})$

Vaihtoehto 4 (loistelamput) : $3.0 \text{ a } (7\,500 \text{ h } / 2\,500 \frac{\text{h}}{\text{a}})$.

10.3 Valaistusasennusten kustannukset

Valaistuskustannuslaskelmissa on käytetty annuiteettimenetelmää. Annuiteettimenetelmässä investointiin liittyvät eriaikaiset suoritukset muunnetaan annuiteetikertoimen avulla yhtäsuuriksi vuosisummiksi eli annuiteeteiksi käyttöajan kullekin vuodelle.

Annuiteettikerroin saadaan yhtälöstä 10.3 [71]

$$a = \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1}, \quad (10.3)$$

jossa

a = annuiteettikerroin

i = laskentakorkokanta

n = pitoaika.

Tässä kustannustarkastelussa on käytetty laskentakorkokantana 10 %, jota arvoa voidaan pitää realistisena yksittäisen teollisuus- tms. laitoksen kustannuslaskelmissa käyttämänä korkokantana. Valaistuksen pitoaikana on laskelmissa käytetty 12 vuotta, jota voidaan pitää sopivana valaisimien käyttöikään perustuvana poistoaikana teollisuus- ja urheiluhalliasennuksissa. Kun nämä arvot sijoitetaan yhtälöön 10.3 saadaan annuiteettikertoimeksi $a = 0.147$.

Valaistuskustannukset muodostuvat kiinteistä ja muuttuvista kustannuksista. Kiinteisiin kustannuksiin kuuluvat valaistussähköverkon asennuskustannukset, valaisimien hankinta- ja asennuskustannukset sekä ensimmäisten lamppujen hankintakustannukset. Näiden valaistuksen hankintakustannusten vuotuismaksu eli annuiteetti saadaan yhtälöstä [71]

$$K_a = aN(K_{as} + K_{vl}) = K_{a,as} + K_{a,vl}, \quad (10.4)$$

jossa

K_a = vuotuismaksu (mk/a)

a = annuiteettikerroin

N = valaisimien lukumäärä

K_{as} = asennuskustannukset (mk/valaisin)

K_{vl} = valaisimen ja valaisimessa olevien lamppujen hankintakustannukset (mk/valaisin)

$K_{a,as}$ = asennuskustannusten vuotuismaksu (mk/a)

$K_{a,vl}$ = valaisimien ja valaisimessa olevien lamppujen hankintakustannusten vuotuismaksu (mk/a).

Valaisimien lukumäärät kussakin tapauksessa on esitetty taulukossa 10.2. Asennuskustannukset on esitetty luvussa 10.2.3.2. Valaisimien ja lamppujen hintatiedot on esitetty taulukossa 10.3.

Muuttuvat kustannukset muodostuvat energiakustannuksista, lamppukustannuksista sekä lamppujen vaihto- ja puhdistuskustannuksista.

Vuotuiset energiakustannukset saadaan yhtälöstä [71]

$$K_e = Pt_v e, \quad (10.5)$$

jossa

K_e = vuotuiset energiakustannukset (mk/a)

P = valaistuksen kokonaisteho (kW)

t_v = lamppujen vuotuinen polttoaika (h/a)

e = energian hinta (mk/kWh).

Pienjännitetehotariffissa kulutetun energian hintaan vaikuttaa energiamaksun (mk/kWh) ohella myös tariffin tehomaksu (mk/kW,a). Tehomaksusta aiheutuva lisä energian hintaan saadaan jakamalla vuotuiset tehomaksut (mk/kW) huipputehon käyttöajalla (h). Huipputehon vuotuisen käyttöaikaan vaikuttaa koko kohteen vuosikulutus (kWh) sekä kuormituksen huipputeho (kW). Koska tässä tapauksessa ei tietoja koko kohteen kulutuksesta tiedetä, on energian hintana laskelmissa käytetty suoraan energiamaksua, joka on 0.27 mk/kWh. Tällä yksinkertaistuksella ei tehtävissä kustannusvertailuissa ole suurta merkitystä. Valaistuksen kokonaistehot saadaan taulukosta 10.2. Valaistuksen vuotuinen käyttöaika on 2 500 tuntia.

Lamppujen huoltokustannuksiin lasketaan lamppujen vaihtokustannusten ja valaisimien puhdistuskustannusten ohella mukaan vaihdettavien lamppujen ja loistelamppujen sytyttimien hankintakustannukset. Keskimääräiset vuotuiset huoltokustannukset saadaan jakamalla yhden erän kustannukset vaihtovälillä yhtälön 10.6 [71] mukaisesti

$$K_h = \frac{N(H_{la} + H_{vv})}{t_r}, \quad (10.6)$$

jossa

K_h = vuotuiset huoltokustannukset (mk/a)

N = valaisimien lukumäärä

H_{la} = valaisimissa olevien lamppujen hankintahinnat, johon loistelamppuvalaisimissa lisätään sytyttimien hankintahinnat (mk/valaisin)

H_{vv} = valaisimissa olevien lamppujen vaihtokustannukset sekä valaisimen puhdistuskustannukset (mk/valaisin)

t_r = lamppujen ryhmävaihtoväli (a).

Lamppujen vaihto- ja valaisimien puhdistuskustannustiedot sekä lamppujen ryhmävaihtovälit on esitetty luvussa 10.2.3.4.

Kunkin valaistusasennuksen vuosikustannukset saadaan sijoittamalla kustannuslaskelmissa tarvittavat tiedot yhtälöihin 10.4 - 10.6 ja laskemalla eri kustannustekijöistä aiheutuvat vuosikustannukset yhteen. Taulukossa 10.4 on esitetty kunkin vaihtoehdon kustannustekijät sekä näistä laskettu vuosikustannusten summa. Valaisimien ja ensimmäisten lamppujen hankintakustannukset sekä valaisimien asennuskustannukset muodostavat yhdessä valaistuksen hankintakustannukset yhtälön 10.4 mukaisesti. Vuosikustannuksiin kuuluvat lisäksi valaistuksen energiakustannukset (yhtälö 10.5) sekä valaisimien huoltokustannukset (yhtälö 10.6). Taulukossa 10.4 on lisäksi esitetty kussakin vaihtoehdossa tarvittava valaisinmäärä sekä valaisimissa olevien lamppujen kokonaismäärä.

Taulukko 10.4 Valaistusasennusten vuosikustannukset.

Vaihtoehto	Valaisimien/ lamppujen lukumäärä	Valaisimien ja ensimmäisten lamppujen hankinta $K_{a,vt}$ mk/a	Asennus $K_{a,as}$ mk/a	Energia K_e mk/a	Huolto K_h mk/a	Yht. mk/a
1.	171/171	28 053	15 283	31 742	17 456	92 534
2.	116/116	19 456	10 368	21 533	7 830	59 187
3.	196/196	18 267	17 518	35 192	4 083	75 060
4.	182/546	22 112	16 159	26 168	10 207	74 646

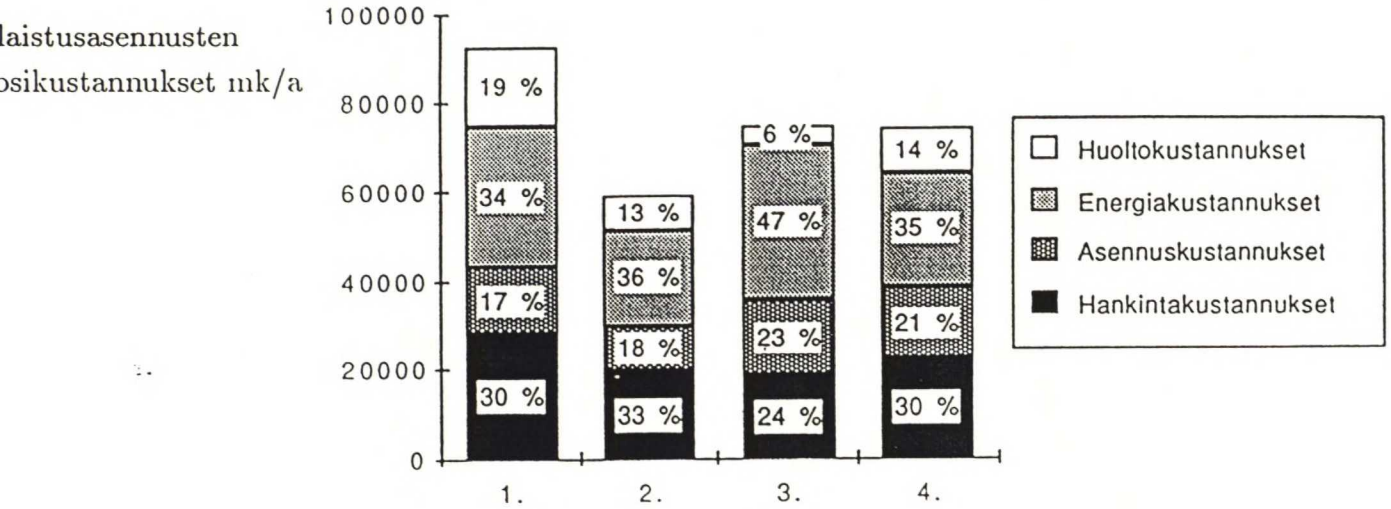
Vaihtoehto 1. = monimetallilamput

Vaihtoehto 2. = värikorjatut suurpainenatriumlamput

Vaihtoehto 3. = elohopealamput

Vaihtoehto 4. = loistelamput.

Valaistusasennusten vuosikustannusten muodostumista havainnollistaa kuva 10.1, jossa taulukon 10.4 kustannustiedot on esitetty pylväsdiagrammien muodossa. Kunkin valonlähdevaihtoehdon pylväsdiagrammiin on merkitty eri kustannustekijöiden prosentuaalinen osuus vuotuisista kokonaiskustannuksista.



Vaihtoehto 1. = monimetallilamput

Vaihtoehto 2. = värikorjatut suurpainenatriumlamput

Vaihtoehto 3. = elohopealamput

Vaihtoehto 4. = loistelamput

Kuva 10.1 Eri valonlähteisiin perustuvien valaistusasennusten vuosikustannukset.

10.4 Kustannuslaskelmien tarkastelu

Tehdyssä valaistusasennusten kustannusvertailussa muodostui monimetallilamppuasennus vuosikustannuksiltaan korkeimmaksi. Elohopealamppuasennuksen ja loistelamppuasennuksen valaistuskustannukset muodostuivat vuosikustannuksiltaan lähes saman suuruisiksi. Vaihtoehto 2, jossa valonlähteinä olivat värikorjatut suurpainenatriumlamput, muodostui vuosikustannuksiltaan edullisimmaksi. Seuraavassa tarkastellaan eri vaihtoehtojen kokonaiskustannusten muodostumista sekä eri vaihtoehtojen kustannusten keskinäisiä eroja, joita havainnollistaa kuva 10.1.

Eri vaihtoehtoissa suurimmiksi kustannustekijöiksi muodostuivat energiakustannukset sekä hankintakustannukset. Suurin energiakustannusten osuus kokonaiskustannuksista (47 %) on elohopealamppuasennuksessa. Muissa vaihtoehtoissa energiakustannukset muodostavat noin kolmanneksen (34 - 36 %) kokonaiskustannuksista. Elohopealamppuasennuksen hankintakustannukset muo-

dostavat noin neljänneksen (24 %) kokonaiskustannuksista, muissa vaihtoehtoissa hankintakustannusten osuus kokonaiskustannuksista on noin kolmannes (30 - 33 %). Asennuskustannusten osuus kokonaiskustannuksista on eri vaihtoehtoissa noin viidennes (17 - 23 %). Monimetallilamppuasennuksessa huoltokustannukset muodostavat noin viidenneksen (19 %) kokonaiskustannuksista. Muissa vaihtoehtoissa huoltokustannukset muodostuvat selvästi pienimmäksi kustannustekijäksi.

Vaikka monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen hankintahinnat ovat samaa luokkaa ja valaisimien hankintahinnat yhtä suuret, muodostuvat monimetallilamppuasennuksen hankintakustannukset värikorjattuihin suurpainenatriumlamppuihin nähden huomattavasti suuremmiksi. Tähän on syynä monimetallilamppujen alhaisemmasta valotehokkuudesta sekä myöskin polttoainä aikana tapahtuvasta suuremmasta valovirran alenemasta johtuva monimetallilamppuasennuksessa tarvittava suurempi valaisinmäärä. Toisaalta taas vaikka elohopealampun valotehokkuus on tarkastelluista lamppuista alhaisin, ovat elohopealamppuasennuksen valaisimien ja ensimmäisten lamppujen hankintakustannukset kaikista vaihtoehtoista pienimmät. Tämä johtuu elohopealampun sekä valaisimen hankintahinnan edullisuudesta. Kaikille purkauslamppuille käytetään samaa valaisintyyppiä, mutta erilaisista liitäntälaitteista johtuen elohopealamppukäytössä valaisimen hinta on huomattavasti alhaisempi monimetallilamppuihin ja suurpainenatriumlamppuihin verrattuna. Elohopealamppu ei tarvitse erillistä sytytintä kuten em. lamput.

Valaistusasennusten yksikkökustannukset (mk/valaisin) ovat samat kaikille purkauslamppuvalaisimille ja lähes yhtä suuret myös purkauslamppuvalaisimen ja loistelamppuvalaisimen kesken. Selvästi pienimmiksi asennuskustannukset muodostuvat kuitenkin asennuksessa, jossa valonlähteinä ovat värikorjatut suurpainenatriumlamput. Tähän on syynä lamppujen korkeasta valotehokkuudesta sekä myöskin monimetallilamppuihin ja loistelamppuihin nähden pienemmästä valovirran alenemasta johtuen pienempi tarvittava valaisinmäärä.

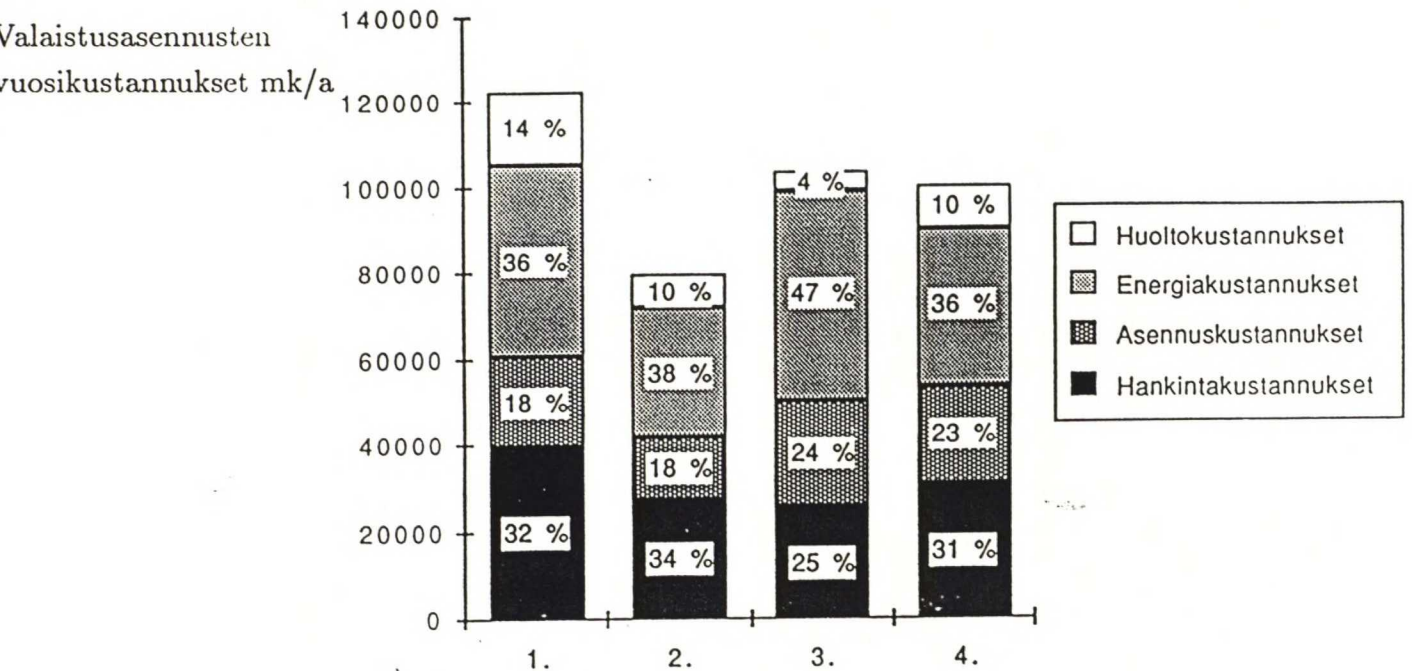
Eri vaihtoehtojen välisiä energiakustannuseroja voidaan verrata vertailemalla suoraan kunkin tapauksen valaistuksen kokonaistehoja (taulukko 10.2). Elohopealamppujen alhaisesta valotehokkuudesta johtuen on elohopealamppuasennuksessa tarvittava valaisinmäärä suurin, vaikka elohopealamppujen valovirran alenemakerron onkin korkeampi kuin monimetallilamppuilla ja loistelamppuilla. Elohopealamppuasennuksen energiakustannukset ovat tarkastelluista vaihtoehtoista suurimmat. Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen korkeasta valotehokkuudesta johtuen on tämän asennuksen valaistuksen kokonaisteho pienin ja täten myös energiakustannukset muodostuvat pienimmiksi.

Valaistuksen huoltokustannuksissa muodostuvat erot eri asennusvaihtoehtojen kesken huomattavankin suuriksi. Huoltokustannukset käsittävät lamppujen vaihdosta ja valaisimien puhdistuksesta aiheutuvien kustannusten lisäksi myös vaihdettavien lamppujen hankintakustannukset. Monimetallilamppuasennuksen selvästi muita vaihtoehtoja suurempiin huoltokustannuksiin on osaltaan syynä lamppujen lyhyemmät polttoiät muihin lamppuihin verrattuna, jolloin myös lamppujen ryhmävaihtoväli on pienin. Vaikka loistelamppujen ryhmävaihtoväli ei ole merkittävästi monimetallilamppuja pidempi, jäävät loistelamppuasennuksen huoltokustannukset monimetallilamppuihin nähden pienemmiksi loistelamppujen alhaisemmasta hankintahinnasta johtuen. Vaikka elohopealamppuasennuksen lamppujen lukumäärä on suhteellisen suuri, jäävät tämän asennuksen huoltokustannukset alhaisimmiksi lamppujen pitkästä polttoiästä sekä alhaisesta hankintahinnasta johtuen.

10.4.1 Lähtöarvojen vaikutus kustannuslaskelmiin

Seuraavassa on eri valonlähdevaihtoehtojen valaistuskustannuslaskelmat suoritettu muuttamalla hieman edellisissä laskelmissa käytettyjä lähtöarvoja. Laskentakorkokantana on seuraavissa laskelmissa käytetty 16 % (edellisissä laskelmissa 10 %) ja valaistuksen pitoaikana 10 vuotta (edellisissä laskelmissa 12 vuotta). Energian hintana käytetään seuraavassa HKE:n yleistariffin mukaista energiamaksua 0.377 mk/kWh (edellisissä laskelmissa HKE:n pienjännitetehtotariffin mukainen energiamaksu 0.27 mk/kWh). Muut kustannustiedot pysyvät seuraavissa laskelmissa muuttumattomina.

Kun kustannuslaskelmissa tarvittavat tiedot edellä esitetyn mukaisesti muutettuina sijoitetaan yhtälöihin 10.3 - 10.6 saadaan laskettua kunkin valonlähdevaihtoehdon valaistusasennusten vuosikustannukset. Laskelmien tuloksia on havainnollistettu kuvassa 10.2. Kuten kuvassa 10.1, on kuvassa 10.2 kunkin valonlähdevaihtoehdon pylväsdiagrammiin merkitty eri kustannustekijöiden prosentuaalinen osuus vuotuisista kokonaiskustannuksista.



Vaihtoehto 1. = monimetallilamput

Vaihtoehto 2. = värikorjatut suurpainenatriumlamput

Vaihtoehto 3. = elohopealamput

Vaihtoehto 4. = loistelamput

Kuva 10.2 Lähtöarvojen muutoksien jälkeen saadut eri valonlähteisiin perustuvien valaistusasennusten vuosikustannukset.

Tehdyt lähtöarvojen muutokset eivät aiheuta muutoksia eri vaihtoehtojen vuosikustannusten suuruusjärjestyksessä. Kaikissa vaihtoehtoissa vuosikustannukset nousevat noin 35 % edellisten laskelmien kokonaiskustannuksista.

Laskentakorkokannan nostaminen ja valaistuksen pitoajan lyhentäminen merkitsevät valaisimien ja lamppujen hankintakustannusten sekä asennuskustannusten vuotuismaksun nousemista. Näiden kustannustekijöiden osuus kokonaiskustannuksista kasvaa hieman kaikissa vaihtoehtoissa.

Energian hinnan nostamisen seurauksena nousevat valaistusasennusten energiakustannukset. Energiakustannusten osuus kokonaiskustannuksista nousee hieman eri vaihtoehtoissa lukuunottamatta elohopealamppuasennusta, jossa energiakustannukset edelleen muodostavat 47 % kokonaiskustannuksista.

Valaistuksen huoltokustannukset säilyvät samansuuruisina kuin edellisissä laskelmissa. Muiden kustannustekijöiden noustua pienenee huoltokustannusten

osuus kokonaiskustannuksista kaikissa vaihtoehtoissa. Myös monimetallilamp-
puasennuksen huoltokustannusten osuus kokonaiskustannuksista on nyt selvästi
monimetallilamppuasennuksen muita kustannustekijöitä pienempi.

10.5 Yhteenveto

Tehdyn valaistuskustannustarkastelun yhteydessä on muistettava, ettei tarkas-
telun tuloksia voida soveltaa mihinkään yksittäistapaukseen, vaan tulokset riip-
puvat suuresti asetetuista lähtötiedoista. Tarkastelussa käytettiin kustakin va-
lonlähteestä vain yhtä lampputyyppiä ja teholuokkaa, mikä myös estää tulosten
yleistämisen eri valonlähdekokonaisuuksia koskeviksi. Tässä tarkastelussa käy-
tettyjen lähtötietojen osalta mainittakoon, että valaistuksen huoltokustannuk-
siin kuuluvissa lampun vaihto- ja valaisimen puhdistuskustannuksissa on suu-
riakin eroja työn suorittavasta siivousliikkeestä riippuen. Tarkastelussa käytet-
tyjen lamppujen polttoikien kohdalla on muistettava, että polttoiät perustuivat
valovirran alenemakäyristä ja kuolleisuuskäyristä määritettyihin keskiarvoihin.
Lamppujen todelliseen polttoikään vaikuttavat mm. sytytystaajuus sekä käy-
tännön olosuhteet. Kussakin tapauksessa on lamppujen vaihtoväli määritettävä
käytännön kokemukseen ja lampuista tehtyihin havaintoihin perustuen.

Kuten luvussa 10.1 mainittiin, on kussakin valonlähteiden valintatapauksessa
kiinnitettävä taloudellisuuden ohella huomiota myös valonlähteiden muihin omi-
naisuuksiin. Vaikka monimetallilamppu tässä tarkastelussa osoittautui vuosi-
kustannuksiltaan kalleimmaksi, on käyttökohteita, joissa se osoittautuu ainoaksi
hyväksyttäväksi vaihtoehdoksi erinomaisten väriominaisuuksiensa johdosta.

Käyttökokemuksia värikorjatuista suurpainenatriumlampuista on vielä vähän,
mikä osaltaan saattaa olla hidastamassa siirtymistä tämän lampun käyttöön.
Tässä tarkastelussa mukana olleen värikorjatun suurpainenatriumlampputyypin
käyttöä puoltaa kuitenkin sen taloudellisuus, johon vaikuttavat korkea valote-
hokkuus sekä pitkä polttoikä. Lisäksi lampun värintoisto-ominaisuudet ovat
paremmat kuin elohopealampulla sekä tavallisella suurpainenatriumlampulla
värintoistoindeksin ollessa $R_a = 60 \dots 65$. Näiden värikorjattujen suurpainenat-
riumlamppujen teholuokat ovat 150, 250 ja 400 W. Lamput ovat varteenotettava
vaihtoehto valonlähteeksi käyttökohteisiin, joissa halutaan hyvää värintoistoa,
lämminsävyistä valoa sekä taloudellisesti toteutettu valaistus.

11. Yhteenveto

Monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen etuja ovat mm. hyvät värintoisto-ominaisuudet ja korkea valotehokkuus. Lamppujen valontuotto perustuu purkausputkessa tapahtuvaan korkeapaineiseen kaasupurkaukseen. Monimetallilampuissa voidaan valoa tuottavina aineina käyttää useita eri metalleja. Metallit ovat monimetallilampun purkausputkessa halogeeniyhdisteinä. Yleisimmin käytetty halogeeni monimetallilamput on jodi. Värikorjatun suurpainenatriumlampun parannettu värintoisto tavalliseen suurpainenatriumlamppuun nähden perustuu purkausputkessa olevan natriumin korotettuun höyrynpaineeseen.

Markkinoilla on useita erityyppisiä monimetallilamppuja yleiskäyttöön tarkoitettujen lamppujen tehovalikoiman ollessa 32 - 3500 W. Monimetallilamppujen väriominaisuudet riippuvat purkausputkessa käytetyistä metalliyhdisteistä. Lamppujen värilämpötila on välillä 3000 ... 6000 K ja värintoistoindeksi $R_a = 65 \dots 90$. Monimetallilamppujen valotehokkuus on 50 - 85 lm/W lampputyypistä ja -tehosta riippuen.

Värikorjatut suurpainenatriumlamput voidaan valon väriominaisuuksien perusteella jakaa kahteen ryhmään. Värintoistoindeksin $R_a = 60 \dots 65$ omaavien värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen värilämpötila on 2150 ... 2200 K ja tehovalikoima on 150 - 400 W. Näiden lamppujen valotehokkuus on korkea, 70 - 85 lm/W. Värintoistoindeksin $R_a > 80$ omaavien värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen värilämpötila on 2500 K ja tehovalikoima 35 - 100 W. Näiden lamppujen valotehokkuus 30 - 40 lm/W.

Monimetallilamput ja värikorjatut suurpainenatriumlamput soveltuvat useisiin erityyppisiin käyttökohteisiin sekä sisä- että ulkokäyttöön. Lamppujen käyttökohteita ovat mm. myymälät, julkiset tilat, urheiluhallit, teollisuustilat sekä kaupunkivalaistus. Kaksikantaiset monimetallilamput soveltuvat myös toimistotilojen valaistukseen. Monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen haittapuolia ovat syttymis- ja jälleensyttymisajat sekä herkkyyss verkkojännitevaihteluille ja sammuminen jännitekatkoksissa. Monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen hankintahinnat ovat moninkertaisia loiste-, pienloiste- ja halogeenilamppuihin verrattuna.

Tehdyssä valaistuskustannustarkastelussa tutkittiin suurehkon sisätilan valaistuksesta aiheutuvia kustannuksia, kun valonlähteinä käytettiin vaihtoehtoisesti

monimetalli-, elohopea-, loiste- ja värikorjattuja suurpainenatriumlamppuja. Värikorjattu suurpainenatriumlamppu (250 W) havaittiin tehdyssä vertailussa vuosikustannuksiltaan edullisimmaksi. Tämän lampputyypin etuja vastaavantehoiseen monimetallilamppuun verrattuna ovat korkeampi valotehokkuus ja pidempi polttoikä.

Verkkojännitevaihtelut aiheuttavat muutoksia monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen sähköisissä arvoissa ja valontuotossa. Valmistajat ilmoittavat lampuilleen sallitun verkkojännitevaihtelualueen, joka on tyypillisesti $\pm 5\%$ nimellisjännitteestä. Verkossa tapahtuvien jännitekatkosten seurauksena monimetallilamput ja suurpainenatriumlamput sammuvat. Myös syöttöjännitteessä tapahtuvat äkilliset jännitetason putoamiset voivat aiheuttaa lamppujen sammumisen.

Monimetallilampun polttoasentoa rajoittavat purkausputken lämpötasapainossa tapahtuvat muutokset. Tästä johtuen on useimpien monimetallilamppujen polttoasento rajoitettu. Värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen polttoasento on vapaa.

Ympäristön lämpötilalla ei ole merkittävää vaikutusta lamppujen toimintaan. Suomen oloissa ei monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen syttymisessä ole havaittu ongelmia.

Valaisinsuunnittelussa on otettava huomioon lamppujen oikean toiminnan takaava lämpötasapaino. Mikäli liian suuri osuus purkauksessa syntyneestä lämmöstä jää valaisimen sisälle, on tästä seurauksena lamppujännitteen kasvu. Liiallinen lamppujännitteen kasvu lyhentää lampun elinikää.

Erityisesti kaksikantaisten monimetallilamppujen käytön yhteydessä on kiinnitettävä riittävästi huomiota lamppujen UV-säteilyn tuottoon, sillä lamppujen kvartsilasinen ulkokupu läpäisee purkauksessa syntyneen UV-säteilyn. Lamppuja tulee aina polttaa valaisimessa, joka on varustettu UV-säteilyn absorboivalla suojuksella.

Monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen valovirtaa voidaan periaatteessa säätää tietyin rajoituksin. Lamppujen säädön on tapahduttava hitaasti, sillä liian nopea säätö voi aiheuttaa lamppujen sammumisen. Monimetallilampuille ovat kuitenkin ominaisia voimakkaat valon värin muutokset valovirtaa säädettäessä, mikä johtuu purkausputken lämpötilassa

tapahtuvista muutoksista. Myös värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen väriominaisuudet muuttuvat valovirtaa säädettyä lamppujen valon alkaessa alhaisilla valovirran arvoilla muistuttaa tavallisen suurpainenatriumlampun keltaista valoa. Tehdyissä mittauksissa tutkittiin syöttöjännitteen säädön vaikutusta erityyppisten monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen toimintaan ja erityisesti väriominaisuuksiin. Monimetallilampuilla todettiin värilämpötilan muutoksien olevan selvästi havaittavia jo syöttöjännitevaihtelualueella $\pm 5\%$ liitäntälaitteen nimellisjännitteestä. Poikkeuksen muodosti elektronisella liitäntälaitteella varustettu monimetallilamppu. Alhaisilla valovirran arvoilla olivat monimetallilamppujen valon värimuutokset jo varsin merkittäviä. Myös mitatun värikorjatun suurpainenatriumlampun ($R_a = 60$) valon väri muuttui selvästi alhaisilla valovirran arvoilla. Värintoistoindeksin $R_a > 80$ omaavat 35 - 100 W värikorjatut suurpainenatriumlamput eivät sovellu säädinkäyttöön lamppujen sytytinlaitteen sisältämästä elektronisesta tehon stabilointipiiristä johtuen.

Syöttöjännitevaihteluiden ja valovirran säädön vaikutuksesta monimetallilamppujen ja värikorjattujen suurpainenatriumlamppujen toimintaan on eri tahoilla tehty vähän tutkimusta. Työn yhteydessä tehdyissä mittauksissa oli mukana viisi erityyppistä monimetallilamppua ja kaksi erityyppistä värikorjattua suurpainenatriumlamppua. Koska varsinkin monimetallilampputyyppejä on useita on lamppujen perusteellisen tutkimuksen edellytyksenä useamman lampputyypin mukaanottaminen kokeisiin samoin kuin kustakin lampputyypistä tutkittavan lamppumäärän lisääminen.

Lähdeluettelo:

- [1] Kuhl B., Dobbruskin A.: The family of metal halide lamps. *Lighting Design & Application* September 1975, s.2-10.
- [2] Thornton W.A., Larson D.A., Chen E.: A Three-band HID lamp with brilliant color-rendering. *IES Annual Conference 1983 California*.
- [3] Fromm D.C., Seehawer J., Wagner W.J.: A metal halide high pressure discharge lamp with warm white colour and high efficacy. *Lighting Research and Technology*, Vol.11 (1979) 1, s.1-8.
- [4] Tielemans P., Drop P., Lorenz R.: Spectral properties of metal halide lamps with rare earth or Sc additives. *3rd International Symposium on the Science and Technology of Light Sources*, Toulouse 1983.
- [5] McAllister W.A., Township M.: Metal halide lamp having lead metal powder to reduce blackening. *U.S. Patent 4.245.175 January 1981*.
- [6] Spencer J.E., Bhattacharya A.K.: Metal halide lamp containing ThI with added elemental cadmium or zinc. *U.S Patent 4.360.756 November 1983*.
- [7] Dobrusskin A.: Review of metal halide lamps. *4th International Symposium of Light Sources 1986*.
- [8] Keeffe W.M., Rothwell H.L., Gungle W.C., Scholtz J. A.: Factors in the design of scandium-sodium iodide arc discharge lamps. *GTE Products Corporation Sylvania Lighting Center 1979*.
- [9] Lake W.H., Davenport J.M.: Low wattage metal halide lamps. *Journal of IES January 1982*, s. 66-73.
- [10] Scholtz J.A., Gardner P.J.: Arc discharge lamp comprising Hg, Sc and Li iodide, Sc emission being suppressed. *U.S Patent 4.053.805 October 1977*.
- [11] Keeffe W.M., Krasko Z.K.: A new low wattage metal halide lamp. *Lighting, Design and Application November 1985*, s. 48-52.

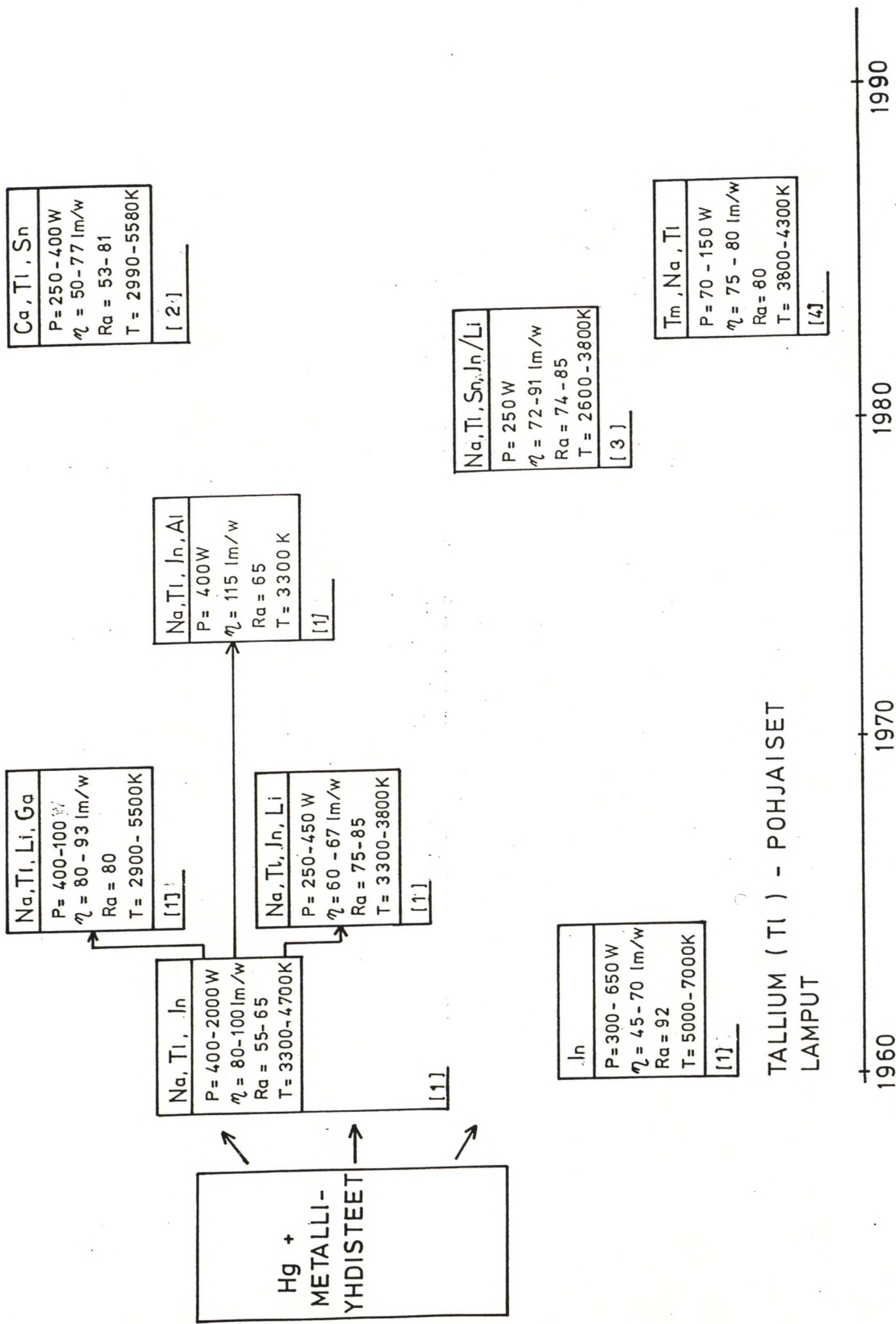
- [12] Wyner E.F., Besterman D., Karlotski R., Feng H.: Increased red output, low color temperature metal halide lamps. *Journal of IES* July 1984, s. 359-367.
- [13] Akihiro I., Kiyokazu H.: Instant start miniature metal halide lamp. 4th International Symposium of Light Sources 1986.
- [14] Popp H.P., Pilz W. U.S Patent 4.020.377 1977
- [15] Tomokiyo K., Fukuda K., Okumura H.: Compact metal halide lamps with excellent color rendering properties. *Natl Tech Rep Matsushita Electr*, Vol.33 (1987) 3, s. 50-56.
- [16] Birkhofer H.P.: 20 Jahre Flutlicht. *Licht*, Vol.41 (1989) 2, s. 78-79.
- [17] Martin H.F., van Ooyen, Lorenz R., Tjampes G.R.: Thulium halide lamps for the lighting of shops and department stores. *IES Annual Conference* 1983.
- [18] Krieg R., Dobrusskin A., Krense H. U.S Patent 4.249.102 1981.
- [19] Drop P.C., de Groot J.J., Jack A.G., Rouweler G.C.: Some aspects of the tin halide molecular arc. *Lighting Research and Technology*, Vol.2 (1974) 4, s. 212-216.
- [20] de Groot J.J., Jack A.G.: Absorption, emission and temperature measurements on mercury/tin iodide arcs. *Applied Physics*, Vol.6 (1973), s. 1477.
- [21] Whittaker F.L.: Properties of sodium tin halide mercury discharges. *Lighting Research and Technology*, Vol.13 (1981) 1, s. 11.
- [22] Higashi T.: Improvement of emission spectra by control of the arc temperature in metal halide lamps. *Journal of Light and Visual Environment*, Vol.5 (1981) 1, s. 19.
- [23] Lorenz R.: Improvement of metal halide lamps by complex formation. *Lighting Research and Technology*, Vol.8 (1976) 3, s. 136.

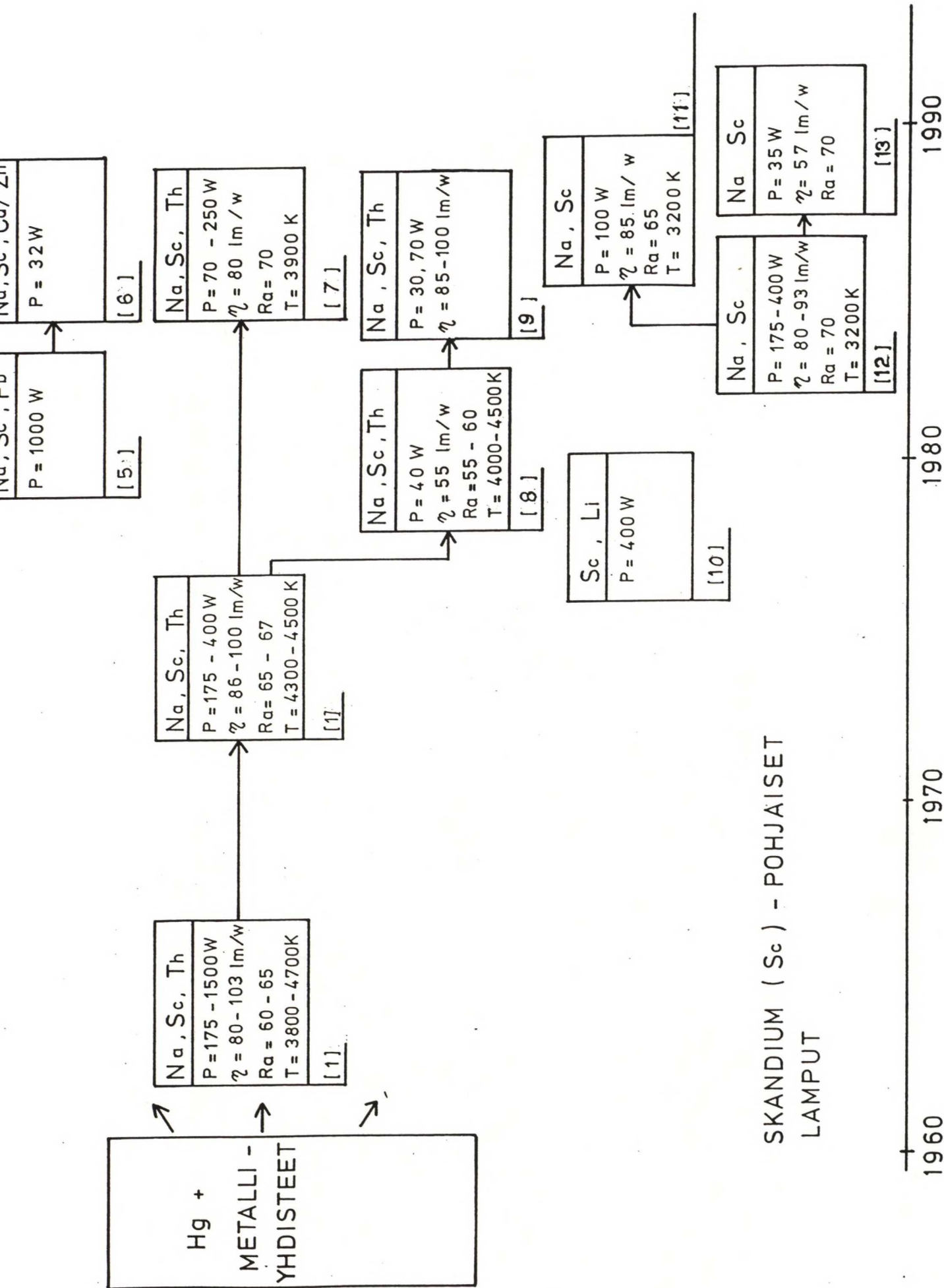
- [24] Liu C.S., Hirayama C., Zollweg R.J.: Spectrophotometric of alkali-rare earth iodide vapour complexes and HID lamps. Journal of IES, Vol.8 (1979) 3, s. 147.
- [25] McAllister W. A. U.S Patent 4.229.673 1980.
- [26] Zollweg R.J., Liu C.S, Hirayama C.: An ultra high efficacy HID lamp. Journal of IES, Vol.4 (1975) 4, s. 249.
- [27] Birkhofer H.P: What is next for low wattage metal halide lamps ?. Lighting in Australia, December 1987, s.14-19.
- [28] Hamming I.: Some recent developments in light sources for general lighting purposes. Philips T.C. & Application News, No 1 1966.
- [29] Meyer C., Nienhuis H.: Discharge lamps. Philips Technical Library, 1988, 312 s.
- [30] de Groot J., van Vliet J.: The high-pressure sodium lamp. Philips Technical Library 1986, 328 s.
- [31] Metalarc lamps. Sylvania Engineering Bulletin 0-344.
- [32] Kivinen A., Mäkitie O.: Kemia. 4. painos Keuruu 1983, 478 s.
- [33] Watanabe K., Suzuki R., Saito M., Tsuchihashi M.: Electrode phenomena in metal halide lamps. Journal of IES October 1983, s. 94-106.
- [34] Osram, lamppuesitteitä.
- [35] Philips, lamppuesitteitä.
- [36] Sylvania, Lamppuluettelo 89/90.
- [37] Power Stars Metal Halide Lamps, Technical data for use in luminaires. Osram. February 1983.
- [38] General Electric, lamppuesitteitä.

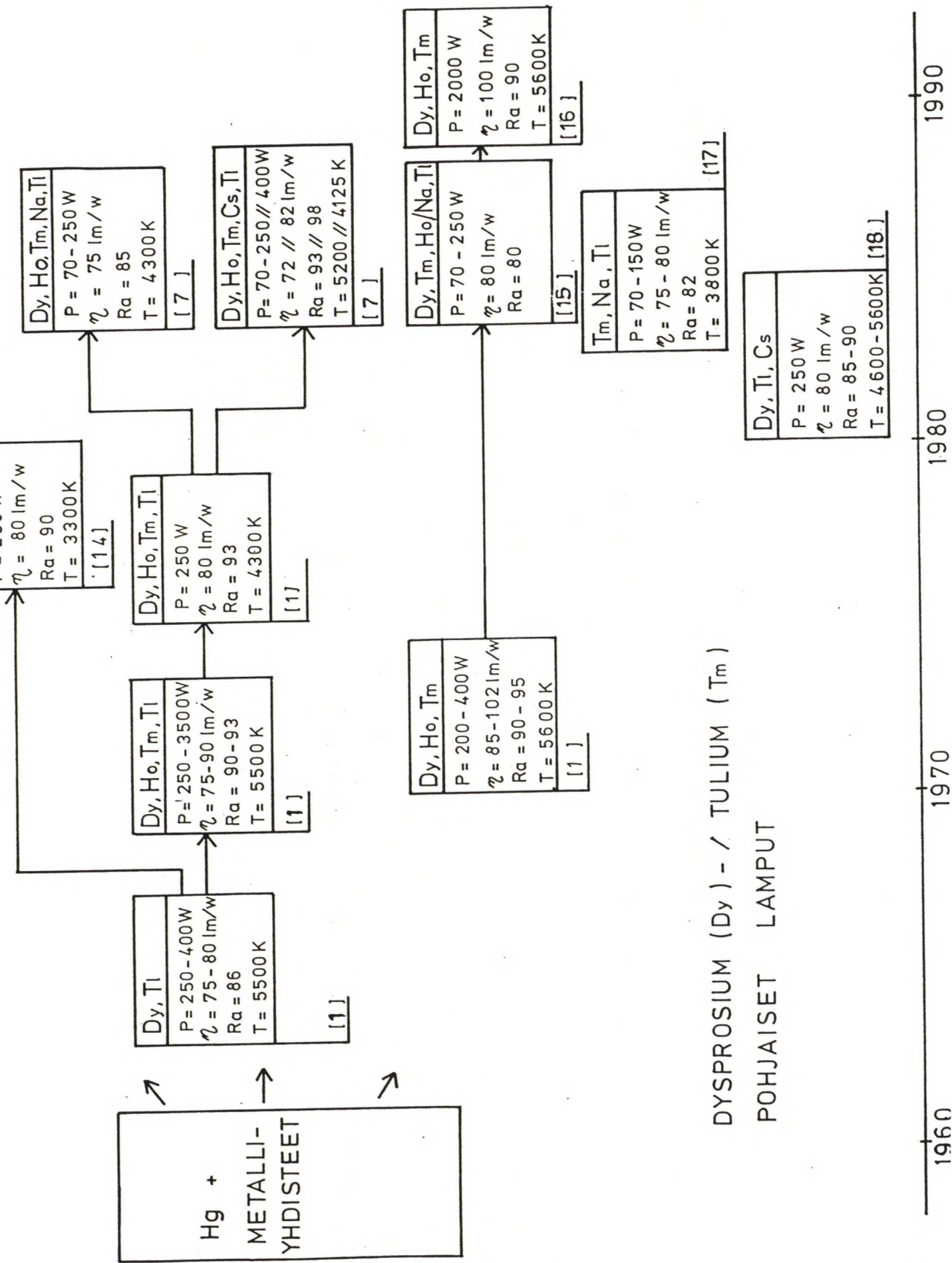
- [39] Cayless M.A., Marsden A.M.: Lamps and lighting. 3. painos 1983, 522 s.
- [40] Statnic E.: High frequency operation of metal-halide high pressure lamps. 4th International Symposium of Light Sources 1986.
- [41] Faehnrich H.J., Rasch E.: Electronic ballasts for metal halide lamps. Journal of IES Summer 1988, s.131-140.
- [42] Cohen S., Lester J.N: Ballasting the miniature metal halide lamp II. Journal of IES October 1984, s. 256- 263.
- [43] Akutsu H., Watarai Y., Saito N., Mizuno H.: A new high-pressure sodium lamp with high color acceptability. Journal of IES July 1984, s. 341-349.
- [44] Bhalla R.S.: Materials considerations for improved color high pressure sodium lamps. IES Annual Conference 1980.
- [45] Akutsu H.: High pressure sodium lamps. 3rd International Symposium on the Science and Technology of Light Sources, Toulouse 1983.
- [46] Kumela J.: Suurpainenatriumlamppujen kehityssuunnat. Esitelmä TKK:n sähköosastolla 10.5.1989.
- [47] High-pressure sodium vapour lamps. IEC Publication 662 (1980).
- [48] Davies I.F.: High pressure sodium lamps and the quadrilateral diagram. CIBS National Lighting Conference 1980.
- [49] Minor K.L.: New self-starting family of high pressure sodium lamps. Manuscript for Annual IES Conference 1981.
- [50] Paavola M.: Valotekniikka. Porvoo 1952, 246 s.
- [51] Schäfer R.: Energy efficient light sources. 4th International Symposium of Light Sources 1986.
- [52] Akutsu H., Watarai Y., Saito N., Mizuno H.: A new high pressure sodium lamp with high color acceptability. Toronto 1981.

- [53] Puhelinkeskustelu Seppo Ylisaaren kanssa 15.8.1989, Osram.
- [54] Keskustelu Jorma Hormion kanssa 29.8.1989, Airam.
- [55] IES Lighting Handbook 1981 Reference Volume.
- [56] Puhelinkeskustelu Esko Kasurisen kanssa 21.9.1989, SLO-Idman.
- [57] Puhelinkeskustelu Markku Kukkosen kanssa 7.8.1989, Helvar.
- [58] Mörsky J., Renkonen R.: UV-säteilyn ja näkyvän valon lääketieteellisiä vaikutuksia. Sähkö, Vol.61 (1988) 5, s.32-33.
- [59] Hietanen M., Hoikkala M.: Ultraviolettisäteily. Työterveyslaitos katsauksia 43 1982, 73 s.
- [60] IES Lighting Handbook 1987 Application Volume.
- [61] Valaistustekniikan käsikirja I. Suomen Sähköurakoitsijaliitto r.y ja Suomen Valoteknillinen Seura r.y. Helsinki 1977, 299 s.
- [62] Saarela K. (VTT): Muovien apuaineet. Yliopiston täydennyskoulutus-esitelmä.
- [63] Ahponen V.: Polykarbonaattimuovista särkymättömiä valaisinkupuja. Sähkö, Vol.47 (1974) 1, s. 16-19.
- [64] Hietanen M., Hoikkala M.: Altistuminen valonheitinten ultraviolettisäteilylle ja siniselle valolle studio- ja näyttämötyössä. Työ ja ihminen, Vol.1 (1987) 2, s. 115-123.
- [65] Page R.B.: A search for an improved ultraviolet radiation source. 4th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources 1986.
- [66] Photometry of floodlights. CIE Publication No 43 1979.
- [67] Photometry of luminaires for street lighting. CIE Publication No 27 1973.

- [68] The measurement of absolute luminous intensity distributions. CIE Publication No 70 1987.
- [69] IES approved method for life testing of high intensity discharge lamps. Journal of IES July 1981, s. 211-213.
- [70] Halme J.: Liikerakennusten valaistus. Diplomityö TKK 1983, 224 s.
- [71] Valaistustekniikan käsikirja II. Suomen Sähköurakoitsijaliitto r.y ja Suomen Valoteknillinen Seura r.y, Helsinki 1982, 371 s.
- [72] Valaistustekniikan käsikirja III. Suomen Sähköurakoitsijaliitto r.y ja Suomen Valoteknillinen Seura r.y, Helsinki 1985, 379 s.
- [73] Jumppanen J.: Kokkolan uimahalli, monimetallilamppu ja sen käyttö. Sähköurakoitsija, Vol.27 (1986) 8, s. 28-29.
- [74] Eskelinen E.: Urheilualueiden valaistusratkaisuja. Sähköurakoitsija, Vol.27 (1986) 8, s. 14-15.
- [75] Tikka J.: Teollisuusvalaistuksen optimointi ottaen erityisesti huomioon käyttötekniset ja taloudelliset näkökohdat. Diplomityö TKK 1988, 148 s.







Hg +
METALLI-
YHDISTEET



Sn, Li / In
P = 400 W
$\eta = 60 - 70 \text{ lm/w}$
Ra = 90-95
T = 3000 - 6000 K
[19]

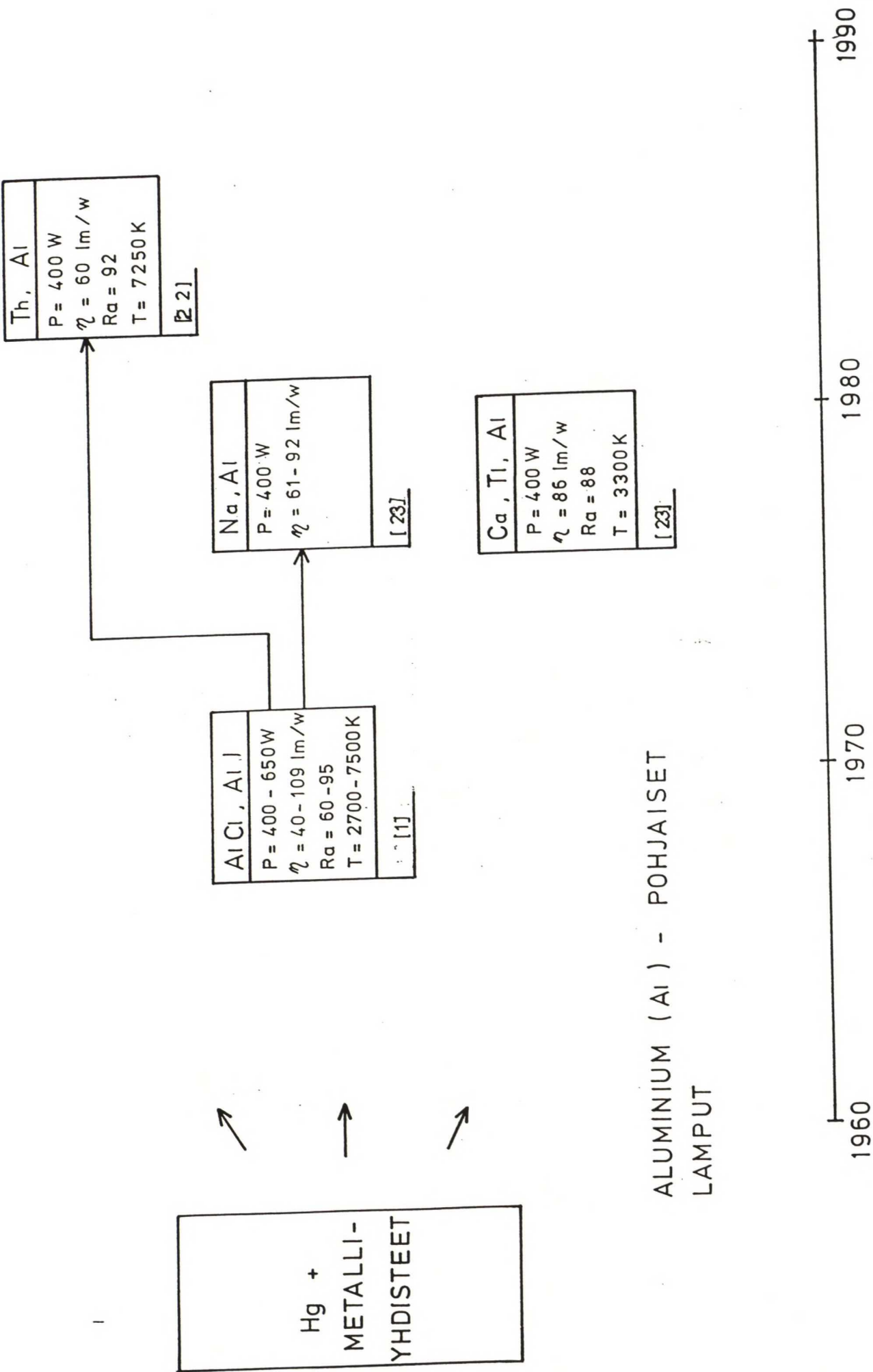
SnI, SnCl, SnBr
P = 125 - 400 W
$\eta = 44 - 65 \text{ lm/w}$
Ra = 85 - 95
T = 3400 - 6500 K
[1]

SnI, SnCl, SnBr
P = 400 - 800 W
$\eta = 60 - 90 \text{ lm/w}$
Ra = 69 - 91
T = 4000 - 6500 K
[20]

Sn, Na
P = 150 - 250 W
$\eta = 86 - 104 \text{ lm/w}$
Ra = 70
T = 3800 K
[21]

TINA (Sn) - POHJAISET
LAMPUT





Hg +
METALLI-
YHDISTEET



CESIUM (Cs) - JA
CERIUM (Ce) - POHJAISET
LAMPUT

Ce, Cs, Sm, Na
P = 800 W
η = 130 lm/w
Ra = 67
T = 5100 K
[26]

Ce/Ce Cs/CeCsNa
P = 400 W
η = 77 - 104 lm/w
T = 4650 - 6100 K

[24]

Nd / Nd, Cs
P = 400 W
η = 77 - 87 lm/w
T = 5750 - 6750 K

[25]

